ENGENHARIA, GESTÃO E INOVAÇÃO

ORGANIZADORES
ALINE MARA OLIVEIRA
OSVALDO SENA GUIMARÃES

VOLUME 20

Editora Poisson

Aline Mara Oliveira
Osvaldo Sena Guimarães
(Organizadores)

Engenharia, Gestão e Inovação
Volume 20

1ª Edição

Belo Horizonte
Editora Poisson
2025

Editor Chefe: Dr. Darly Fernando Andrade

Conselho Editorial
Dr. Antônio Artur de Souza – Universidade Federal de Minas Gerais
MSc. Davilson Eduardo Andrade
Dra. Elizângela de Jesus Oliveira – Universidade Federal do Amazonas
MSc. Fabiane dos Santos
Dr. José Eduardo Ferreira Lopes – Universidade Federal de Uberlândia
Dr. Otaviano Francisco Neves – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais
Dr. Luiz Cláudio de Lima – Universidade FUMEC
Dr. Nelson Ferreira Filho – Faculdades Kennedy
MSc. Valdiney Alves de Oliveira – Universidade Federal de Uberlândia

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

E57

Engenharia, Gestão e Inovação – Volume 20/ Organizadores:Aline Mara Oliveira,Osvaldo Sena Guimarães – Belo Horizonte - MG: Editora Poisson, 2025

Formato: PDF
ISBN: 978-65-5866-539-7
DOI: 10.36229/978-65-5866-539-7

Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia

1. Engenharia 2. Educação. I. OLIVEIRA, Aline Mara II. GUIMARÃES,Osvaldo Sena III. Título.

CDD-620

Sônia Márcia Soares de Moura – CRB 6/1896

O conteúdo deste livro está licenciado sob a Licença de Atribuição Creative Commons 4.0.
Com ela é permitido compartilhar o livro, devendo ser dado o devido crédito, não podendo ser utilizado para fins comerciais e nem ser alterado.

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos seus respectivos autores.

Esse e outros títulos podem ser baixados gratuitamente em www.poisson.com.br
Entre em contato pelo contato@poisson.com.br

SUMÁRIO

Capítulo 1: Knowledge Management Foundations in the design of the IPEM-SP quality infrastructure portal: strategies and challenges 06

Robson Santos da Silva, Roberto Mariano de Araújo Filho, Marcos Oliveira Junior, Eduardo Mario Dias, Maria Lídia Rebello Pinho Dias

DOI: 10.36229/978-65-5866-539-7.CAP.01

Capítulo 2: Gestão de Ativos: uma breve análise de como gerir a manutenção frente as depreciações contábeis 15

Roberta Araújo de Jesus

DOI: 10.36229/978-65-5866-539-7.CAP.02

Capítulo 3: Gestão da qualidade da água: um diagnóstico da Região Hidrográfica do Médio Paraíba do Sul..... 28

Bárbara Fontes Silva, Carin von Mühlen, Nilo Antonio de Souza Sampaio, Bianchi Nogueira Teixeira, Felipe Gomes Balbino, Hugo Pimentel Tavares

DOI: 10.36229/978-65-5866-539-7.CAP.03

Capítulo 4: Modelagem CFD como ferramenta para otimização de sistemas de tratamento de água e efluentes: aplicações, desafios e perspectivas 46

Danieli Soares de Oliveira

DOI: 10.36229/978-65-5866-539-7.CAP.04

Capítulo 5: Reaproveitamento de cavaco de alumínio AA6060 via metalurgia do pó: uma rota alternativa e simplificada para a reciclagem..... 59

Vítor Garbo Bergamin, Bruno Nonemacher, Juliano Cantarelli Toniolo, Lisiane Trevisan

DOI: 10.36229/978-65-5866-539-7.CAP.05

Capítulo 6: Síntese e caracterização de aço rápido produzido por metalurgia do pó 82

Francielle Cristine Pereira Gonçalves, Bruno Caio Chaves Fernandes, Ari Lucas Santos Oliveira, Thaís de Oliveira Almeida, Camilla Pereira Soares, Rennáh Francisco Figueiredo Gonçalves, Gustavo César Pamplona de Sousa, Aline da Silva Oliveira

DOI: 10.36229/978-65-5866-539-7.CAP.06

SUMÁRIO

Capítulo 7: Revestimento de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) como sistema de proteção contra corrosão em oleodutos no RN 91

Thiago Ticiano Aires de Araújo, Andréa Francisca Fernandes Barbosa, Antônio Robson Gurgel, Keila Regina Santana, Jardel Dantas da Cunha

DOI: 10.36229/978-65-5866-539-7.CAP.07

Capítulo 8: Resistência e alongamento em têxteis: análise das padronagens em tela, sarja e cetim 108

Alessandra Brandani Biggi, Elaine Regina Brito Maia Mercial, Suellen Dias Bernardes, Ricardo Yuta Negri Sakata, Maria Renata Moraes, Washington Luiz Félix Santos

DOI: 10.36229/978-65-5866-539-7.CAP.08

Capítulo 9: Análise do desempenho energético de módulo fotovoltaico com inclinação sob condições climáticas em São Luís, Maranhão 122

Lourival Matos de Sousa Filho, João Gabriel Paiva Sousa, Luiz Otávio Algave Chaves, André Barros de Oliveira, Keyll Carlos Ribeiro Martins, Jean Robert Pereira Rodrigues, Wellinton de Assunção, Fernando Lima de Oliveira

DOI: 10.36229/978-65-5866-539-7.CAP.09

Capítulo 10: Aplicação da Metodologia PBL no ensino de Agricultura de Precisão na Engenharia de Biossistemas 136

Jamile Raquel Regazzo, Noé Jamba Tito, Cintia Cristina Soares, Thiago Lima da Silva, Murilo Mesquita Baesso

DOI: 10.36229/978-65-5866-539-7.CAP.10

Autores 143

Capítulo 1

Knowledge Management Foundations in the design of the IPEM-SP quality infrastructure portal: strategies and challenges

Robson Santos da Silva
Roberto Mariano de Araújo Filho
Marcos Oliveira Junior
Eduardo Mario Dias
Maria Lídia Rebello Pinho Dias

Abstract: This paper presents the conceptual, methodological, and technological foundations for a Knowledge Management (KM) model aimed at the digital transformation of the Quality Infrastructure (QI) ecosystem. As a case study, it examines the Quality Infrastructure Services Portal (PSIQ), currently under development by the Sao Paulo State Institute of Weights and Measures (IPEM-SP), at Technology Readiness Level 2 (TRL2). Using a qualitative, exploratory, and applied approach, the study supports the transition of the portal to TRL3. Classical KM models (SECI, DIKW, APO, and Cynefin) are employed to structure knowledge flows, while enabling technologies—such as Intelligent Virtual Assistants, Semantic Search, Big Data & Analytics, and Robotic Process Automation—are mapped to sustain operationalization. The results indicate that PSIQ can function as a cognitive digital platform for regulatory knowledge, institutional memory, interoperability, and strategic learning. The paper concludes with recommendations to consolidate KM as a strategic function in the digital transformation of QI in Brazil.

Keywords: Knowledge Management, Quality Infrastructure, Digital Transformation.

1. INTRODUCTION

Digitalization is a strategy that holds the potential to foster the efficiency of public policies and the provision of public services [1]. In Brazil, its application within Quality Infrastructure (QI)—a system composed of institutions, policies, legal frameworks, and practices that ensure the quality, safety, and environmental integrity of goods and services—directly impacts components such as metrology, standardization, accreditation, conformity assessment, and market surveillance [2].

In this context, the Institute of Measures and Weights of State of São Paulo develop initiatives focused on the digitalization of Quality Infrastructure (QI) to enhance industrial competitiveness, facilitate access to technical information, and promote integration within the productive ecosystem. Among these initiatives, the Quality Infrastructure Services Portal (QISP) stands out as an intelligent digital platform designed to organize, systematize, and disseminate normative content associated with the services provided by the institution.

Currently at TRL 2 (technological formulation), the project requires the definition of structural principles, functional requirements, and enabling technologies. The transition to TRL 3 (experimental validation) depends on a clear methodological approach in designing knowledge flows, curation mechanisms, and interoperability criteria among systems and technical databases.

Thus, this paper explores the conceptual, methodological, and technological foundations that should underpin Knowledge Management (KM) at QISP. In a technical-regulatory environment such as that of Quality Infrastructure (QI), effective KM [3] requires more than mere storage: it demands the organization and dynamization of various types of institutional knowledge—technical-regulatory (standards, regulations), operational (inspection routines, service instructions), and tacit (expert experiences). The importance of updating routines, emerging technologies (AI, Semantic Search, RPA), complementary tools (ontologies, ECM, visual analytics, digital competencies management), and curation strategies aligned with the institutional mission is also highlighted.

The central problem lies in structuring, already at TRL 2, the elements that enable the conversion of tacit, explicit, and automated knowledge into a strategic asset. Accordingly, the paper seeks to answer the following research question: how can KM foundations be structured to support the design of QISP and prepare it for TRL 3, ensuring continuous organization, dissemination, and updating technical-regulatory knowledge?

The approach combines classical KM theoretical models with the portal's technological components, modeling knowledge flows, identifying challenges, and proposing recommendations for its future evolution. The research adopts a qualitative, exploratory, and applied approach, focused on technological formulation and the conceptual modeling of the main informational and cognitive elements.

To this end, the paper is structured as follows:

Section II: the articulation between QI and KM, current gaps, and the role of digital platforms.

Section III: the main theoretical models of KM.

Section IV: the technological strategies of QISP and their connection with KM.

Section V: the methodology for analysis and preparation for TRL 3.

Section VI: the challenges and opportunities of KM at QISP.

2. QUALITY INFRASTRUCTURE AND KNOWLEDGE MANAGEMENT: EMERGING INTERSECTIONS

Digital transformation in public administration has driven the adoption of emerging technologies to modernize services, increase transparency, and strengthen institutional capacity. In the context of Quality Infrastructure (QI), this movement promotes the digitization of technical processes, the integration of regulatory systems, and democratic access to technicalregulatory knowledge [4].

In this scenario, Knowledge Management (KM) becomes a foundational element in the digital transformation of QI. In sectors such as metrology, standardization, and conformity assessment, KM underpins the capture, systematization, updating, and dissemination of critical information—from technical standards and legal requirements to operational instructions and oversight guidelines—whose continuous curation ensures traceability and regulatory confidence.

An effective KM system integrates people, processes, and technology, fostering alignment between institutional knowledge and organizational objectives [5]. At QISP, developed by IPEM-SP, the goal is to transform this knowledge into a structured digital asset that guides users in their technical and legal obligations. This requires more than just digitizing documents; it demands information flows oriented toward usability, interoperability, and continuous updating.

However, according to the Final Report of the Public Subsidies Initiative of the National QI Strategy (ENIQ), significant structural challenges persist: deficiencies in governance, a lack of resources for modernizing the national conformity mark, and limitations in the Brazilian Conformity Assessment System (SBAC). These issues are compounded by the low participation of the private sector in standardization, the regional concentration of services, insufficient investments in laboratory infrastructure and technical training, as well as excessive bureaucracy and disjointedness between standardization and regulation [6].

These limitations call for digital solutions to consolidate and streamline regulatory knowledge flows. Platforms such as QISP, by incorporating technologies like Intelligent Virtual Assistance, Semantic Search, Big Data, and Robotic Process Automation (RPA), do not merely provide information but also structure the governance of technical-regulatory knowledge. These technologies enable intelligent screening, contextualized retrieval of norms, automated responses, and data-driven analyses.

By promoting an institutional culture centered on data curation, interoperability, and continuous learning, these platforms reinforce QI as an integrated system. Their adoption fosters responsive regulation and voluntary conformity, enhancing the effectiveness of public actions and the competitiveness of the productive sector.

Thus, the intersections between QI and KM represent a strategic field for institutional modernization. QISP stands as a concrete opportunity to apply KM principles in a digital regulatory environment, functioning as an institutional laboratory for modeling replicable solutions within Brazil's National System of Metrology, Standardization, and Industrial Quality.

3. KNOWLEDGE MANAGEMENT MODELS FOR TECHNICAL-REGULATORY ENVIRONMENTS

The formulation of a Knowledge Management (KM) model for the Quality Infrastructure Services Portal (QISP) requires a foundation in well-established theoretical frameworks capable of guiding the systematization, curation, and dissemination of technicalregulatory content in complex digital environments. This theoretical basis is especially relevant at TRL 2, which focuses on conceptual and technological structuring, ensuring that institutional knowledge is transformed into a reusable, accessible digital asset aligned with the public mission of QI.

The SECI model describes the mechanisms for converting tacit to explicit knowledge through four processes: socialization, externalization, combination, and internalization [7]. At QISP, it contributes to transforming the knowledge of QI experts into structured digital artifacts, such as regulatory flowcharts, FAQs, manuals, and technical protocols. Once systematized, these contents become accessible repositories for both internal and external users, enhancing access to qualified knowledge.

The DIKW hierarchy (Data, Information, Knowledge, and Wisdom) organizes informational complexity into a semantic chain [8]. At QISP, it structures the process from the collection of raw data (e.g., technical records), through the transformation into organized information, to the generation of useful knowledge for normative interpretation and decision-making. This hierarchy supports the definition of logical layers in information architecture.

The methodology of the Asian Productivity Organization (APO), with its five pillars—leadership, people, processes, technology, and results—guides KM in public institutions [9]. When applied to PSIQ, it fosters performance indicators, continuous feedback, and quality control of content, which are essential for the transition to TRL 3, where evidence of viability is required.

Snowden's Cynefin model classifies decision-making contexts as simple, complicated, complex, or chaotic. At PSIQ, it enables distinguishing between demands that can be automated (e.g., standardized norms) and those requiring specialized analysis (e.g., normative exceptions), thereby optimizing the combined efforts of virtual assistants, human curators, and semantic algorithms.

The KM Maturity model identifies an organization's evolutionary stage—from informal practices to a consolidated KM culture—allowing the portal's functionalities to be calibrated according to institutional maturity [10].

The integration of these models results in a complementary theoretical framework. KM Maturity assesses the level of KM maturity; SECI addresses the conversion of knowledge; DIKW structures informational complexity; APO guides governance; and Cynefin defines appropriate cognitive responses. This combined framework supports a robust KM system for QISP, catalysing the digital modernization of QI in Brazil.

4. TECHNOLOGICAL STRATEGIES AND THEIR CONNECTION WITH KNOWLEDGE

The development of a Knowledge Management (KM) model in Quality Infrastructure (QI) requires technologies capable of structuring and energizing technical-regulatory information flows. In the case of the Quality Infrastructure Services Portal (QISP), KM

demands more than a mere digital repository; it requires technological architecture based on accessibility, continuous updating, interoperability, and intelligent curation [3].

Among the essential technologies, Intelligent Virtual Assistance—based on Natural Language Processing (NLP) stands out as a mediator between users and normative content. Well-trained chatbots simulate human interactions and provide precise, contextualized responses, thereby reducing informational bottlenecks and democratizing access to institutional knowledge [11].

Advanced Semantic Search goes beyond keyword-based retrieval by integrating context, user intent, and conceptual synonyms [12]. This approach is critical in QI, where technical terminology varies according to the regulated sector, resulting in a more responsive and inclusive information architecture.

Big Data and Analytics enable the generation of knowledge from large volumes of structured and unstructured data. By identifying patterns, anticipating demands, and feeding back into decision-making processes, these tools reveal frequent inquiries, norms with high non-compliance, and priority topics [13].

Robotic Process Automation (RPA) supports the operationalization of KM by automating repetitive tasks such as document indexing, standardized responses, and metadata updating. This automation liberates human resources for curation activities and reduces errors, promoting scalability and standardization [14].

Additional complementary technologies enrich the KM ecosystem. Technical ontologies foster interoperability between systems and knowledge domains, while Enterprise Content Management (ECM) systems ensure version control, traceability, and document approval processes. Visual analytics tools, including dashboards and dynamic panels, facilitate the monitoring of KM effectiveness [15].

Equally important is the management of digital competencies, which connects institutional knowledge and human development. Solutions that map skills, provide learning pathways, and promote technical-regulatory upskilling reinforce the sustainability of KM as an organizational practice.

The strategic distinction between essential technologies (focused on operations) and complementary ones (aimed at quality and sustainability) consolidates QISP as an adaptive, data-driven platform with embedded institutional intelligence. Consequently, the technological infrastructure of QISP should be understood as a cognitive platform focused on organizational learning, decision traceability, and regulatory transparency. In a dynamic and demanding environment, the integration of these technologies is indispensable for establishing KM as a strategic function in digital QI.

5. METHODOLOGY FOR STRUCTURING AND PREPARATION FOR TRL3

The nature of this study, centered on the conceptual and technological analysis of Knowledge Management (KM) in Quality Infrastructure (QI), demands a methodological approach that integrates theory, modeling, and application. For exploratory and applied purposes, the research aligns with the logic of projects in the technological formulation phase (TRL 2), aiming to support the transition to TRL 3 (experimental validation).

The approach is qualitative, focused on constructing interpretative and propositional knowledge. It is based on the understanding and systematization of complex phenomena—such as the curation of technical-regulatory knowledge in digital

environments—drawing on multiple sources and the integration of theoretical models, institutional practices, and emerging technologies [16].

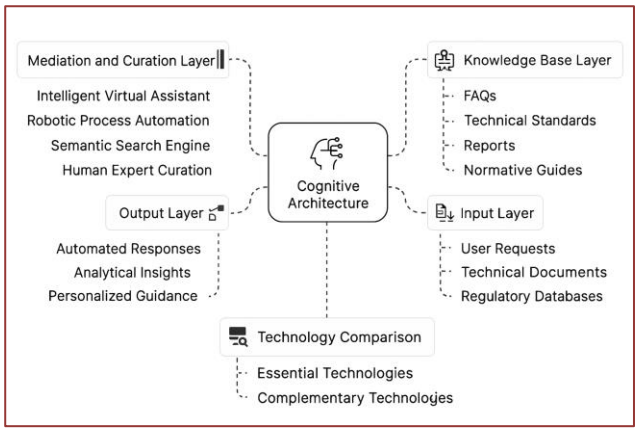
The envisioned methodology is organized into three integrated axes:

1. Requirements Review and Architecture Analysis In this phase, the requirements of QISP are analyzed, with an emphasis on functional flows and the types of knowledge involved: tacit (expert experience), explicit (normative documentation), and automated (algorithmic responses). Traditional QI communication is compared with the flows envisioned for the portal, identifying changes in accessibility, interoperability, and reliability [3]. Conceptual diagrams are also developed using tools such as Napkin AI, graphically representing the transformation of regulatory information into reusable knowledge and identifying the system's points of entry, mediation, and output.
2. Simulation of Cognitive Flows Applied to KM In this stage, use scenarios for QISP are modeled based on four strategic technologies: Intelligent Virtual Assistance, Semantic Search, Big Data/Analytics, and Robotic Process Automation (RPA). For each technology, micro-cycles of KM are designed to demonstrate: the capture of demands and semantic intent (chatbot); contextualized retrieval (semantic search); pattern identification (analytics); and task automation (RPA) [11][13]. These simulations test, in a controlled environment, the integration between technological modules and KM guidelines, particularly regarding the updating and dissemination of regulatory content.
3. Proposition of Criteria for TRL 3 Based on the previous stages, the minimum criteria for transitioning QISP to TRL 3 must be identified. These include: the existence of a conceptually validated digital KM model with defined flows and actors; the implementation of automated routines for capturing, updating, and disseminating normative content; measurement of system responsiveness and assertiveness based on indicators such as response time, semantic adherence, and resolution rate; and the definition of a pilot testing plan with real users, covering diverse profiles (technicians, entrepreneurs, consumers) and various regulatory themes.

   These strategies are essential for consolidating a methodological model capable of supporting the experimental validation of QISP as a KM platform applied to QI, in accordance with TRL 3 requirements.

   In this context, considering all the aspects outlined in the study, Figure 1 illustrates the proposed structural foundations for Knowledge Management in QISP—a comprehensive representation of the cognitive operational logic and the digital resources that underpin the portal's proposal.

Figure 1. Cognitive and technological architecture for knowledge Management in PSIQ



The organization is structured into four interdependent layers: data inputs, which encompass user demands, technical documents, and external normative databases; mediation and curation mechanisms, composed of technologies such as Intelligent Virtual Assistance, RPA, Semantic Search, and specialized curation; a structured knowledge base, where organized normative content, decision flows, and digital repositories are consolidated; and, finally, strategic outputs, corresponding to the delivery of automated responses, predictive analytics, and personalized guidance to users.

Figure 1 also clarifies the distinction between essential and complementary technologies, highlighting how each is positioned and contributes to the governance of technicalregulatory knowledge. Thus, it serves as a visual synthesis of the dimensions addressed in Sections III, IV, and V, designed to support the system's conceptual modeling and guide its transition to more advanced levels of technological maturity.

6. CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS

This research explored the conceptual, methodological, and technological foundations required to structure a Knowledge Management (KM) model for the Quality Infrastructure Services Portal (QISP), currently at TRL 2. It demonstrated that the digitization of Quality Infrastructure (QI) requires integrated approaches to transform technical-regulatory knowledge into accessible, updatable, and interoperable assets.

The theoretical analysis revealed that models such as SECI, DIKW, APO, and Cynefin are highly applicable to PSIQ because they enable the conversion of knowledge, the organization of information flows, the alignment of institutional strategies, and the guidance of responses to diverse regulatory contexts. These models underpin KM flows based on human curation, automation, and responsiveness.

In the technological field, four central resources stand out—Intelligent Virtual Assistance, Advanced Semantic Search, Big Data & Analytics, and Robotic Process Automation (RPA)—as fundamental tools for organizing, updating, and disseminating technical knowledge. Complementary technologies such as ontologies, ECM, visual analytics, and digital competencies management further reinforce the sustainability and governance of KM in the digital QI environment.

The proposed methodology demonstrated that preparing for TRL 3 requires more than technical advancement: it is necessary to validate the knowledge architecture, model semantic flows, simulate usage scenarios, and establish evaluation criteria for system maturity. The challenge is to build not only a portal, but also a cognitive platform focused on decision traceability, regulatory transparency, and organizational learning.

Some persistent obstacles include institutional fragmentation, the lack of inter-institutional curation mechanisms, the absence of standardized technical vocabularies, and cultural challenges related to adopting AI-based solutions. However, these barriers also open opportunities for strategic initiatives, such as strengthening IPEM-SP role in digital regulation, expanding access to normative information for micro and small enterprises, and fostering a collaborative KM ecosystem among Sinmetro agencies.

It is recommended that the next project stages include: (i) empirical validation of the simulated flows; (ii) participation of QI specialists in curation and in training the intelligent systems; (iii) use of performance indicators (accuracy, responsiveness, and usability); and (iv) feedback mechanisms based on user interactions.

In conclusion, QISP can consolidate itself as a strategic KM platform in Brazilian QI, provided that its digital architecture is based on scientific foundations, recognized models, and interoperable, adaptive technologies. In advancing in this direction, the portal will not only digitize processes, but also transform the production, mediation, and reuse of regulatory knowledge in the public sector.

REFERENCES

[1] Reck, J. R., & Hübner, B. H. (2021). “A Transformação Digital do Estado: Digitalização do Governo e dos Serviços Públicos no Brasil”. Revista Eletrônica Direito e Política, 16(3), 1075–1096. https://doi.org/10.14210/rdp.v16n3.p1075-1096.

[2] International Network on Quality Infrastructure, "Quality Infrastructure Definition," Geneva: INetQI, 2018.

[3] Chalmeta, Ricardo & Grangel, Reyes. (2008). Methodology for the Implementation of Knowledge Management Systems. Journal of the American Society for Information Science and Technology.

[4] Reck, J. R., & Hübner, B. H. (2021). A Transformação Digital do Estado: Digitalização do Governo e dos Serviços Públicos no Brasil. Revista Eletrônica Direito e Política, 16(3), 1075–1096.

[5] Chalmeta, R., & Grangel, R. (2008). Methodology for the Implementation of Knowledge Management Systems. Journal of the American Society for Information Science and Technology.

[6] Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. Relatório Final da Tomada Pública de Subsídios – Estratégia Nacional de Infraestrutura da Qualidade (ENIQ). Brasília: MDIC, 2024.

[7] Nonaka, I., & Takeuchi, H. (1997). The KnowledgeCreating Company. Oxford University Press.

[8] Rowley, J. (2007). The wisdom hierarchy: representations of the DIKW hierarchy. Journal of Information Science, 33(2), 163–180.

[9] Asian Productivity Organization (APO). (2010). Knowledge Management: Facilitators’ Guide. Tokyo: APO.

[10] Pee, L. G. & Kankanhalli, Atreyi. (2009). A Model of Organisational Knowledge Management Maturity. Journal of Information & Knowledge Management.

[11] Adamopoulou, E., & Moussiades, L. (2020). Chatbots: History, technology, and applications. Machine Learning with Applications, 2, 100006.

[12] López, V., Fernández, M., Motta, E., & Stieler, N. (2017). PowerAqua: Supporting users in querying and exploring the Semantic Web. Semantic Web, 8(3), 403–424.

[13] Chen, M., Mao, S., & Liu, Y. (2014). Big Data: A survey. Mobile Networks and Applications, 19(2), 171–209.

[14] Willcocks, Leslie P., Lacity, Mary and Craig, Andrew, (2015), The IT function and robotic process automation, LSE Research Online Documents on Economics, London School of Economics and Political Science, LSE Library.

[15] Few, S. (2006). Information Dashboard Design: The Effective Visual Communication of Data. O'Reilly Media.

[16] Flick, U. (2009). An Introduction to Qualitative Research. Sage Publications.

Capítulo 2

Gestão de Ativos: uma breve análise de como gerir a manutenção frente as depreciações contábeis

Roberta Araújo de Jesus

Resumo: Em um ambiente acirrado e com constantes mudanças, as organizações que não estiverem embasadas em padrões e normas se tornaram ineficientes perante seus gerenciamentos. A Gestão de Ativos, através da formulação da ISO 55.000 e de suas séries introduz diretrizes, procedimentos, bases, entre outros, que auxiliam a gerir os ativos da organização, considerando estes patrimônios e investimentos necessários para os retornos financeiros. Neste sentido, o presente estudo tem como objetivo analisar considerações acerca de como gerir a manutenção perante o tratamento contábil das depreciações pela Gestão de Ativos, abrangendo todo o ciclo de vida destes bens. Como metodologia a pesquisa possui natureza básica, cujo intuito é aprimorar e produzir novos conhecimentos; sendo os objetivos exploratórios e explicativos, permitindo ampliar as informações e investigar os fatores já existentes; buscando na abordagem qualitativa as interpretações dos dados, a partir de procedimentos bibliográficos em artigos, monografias, teses, sites, entre outros, para a complementação da análise de conteúdos. Entre as principais conclusões e considerações tem-se que a eficiente gestão abrange processos, estratégias e políticas organizacionais que permitem a melhor aplicação das práticas manutentivas, conforme os elementos básicos da normalização e garantindo que as depreciações e suas causas sejam consideradas ao longo do ciclo de vidas dos ativos. Apontando também o tratamento contábil ideal para tais depreciações, bem como o momento certo para tomada de decisão de substituição do ativo, independente das causas.

Palavras-chave: gestão, ativos, manutenção, depreciações.

1. INTRODUÇÃO

As organizações são compostas por bens físicos, como máquinas, equipamentos, utensílios, entre outros, que desenvolvem e auxiliam os processos produtivos; e estes bens são denominados ativos, em especial, perante a Contabilidade como os bens físicos, que são classificados como ativos imobilizados. Podemos destacar que os ativos representam as aplicações dos recursos da empresa, correspondendo aos esforços de investimentos na busca pelo melhor retorno através de sua utilidade (Bachtold, 2011, p. 174). Para Pereira (2016, p. 14), "o tratamento dado sobre os ativos físicos, utilizados para suportar a tomada de decisões, a priorização de investimentos, a determinação de manutenção ideal dos ativos e a frequência de renovação dos mesmos" são pontos a serem considerados na gestão destes, mas até então, não estavam apoiados em padrões e normas específicas de gerenciamento.

Para Zampolli (2012, p. 6), a Gestão de Ativos "é uma novidade no setor público e privado originalmente proveniente de técnicas de gerenciamento utilizadas no mercado financeiro e aplicadas em ambientes competitivos e de alto risco como aviação civil, indústrias de equipamentos hospitalares com alta tecnologia e usinas nucleares"; sendo que sua formalização se deu através da normalização da ISO 55.000 - Gestão de Ativos - Visão Geral, Princípios e Terminologia, em 2014. Consequentemente, as atividades que abrangem o gerenciamento dos bens físicos passaram a ser analisadas de forma holística, envolvendo desde a fase de aquisição do ativo até o seu correto descarte, com o devido planejamento de todo seu ciclo de vida.

Frente a um cenário cada vez mais competitivo, onde a correta Gestão de Ativos sobrevém a ser um diferencial, este estudo aponta a seguinte problemática: Como gerir a manutenção considerando o tratamento contábil das depreciações na Gestão de Ativos? O objetivo é relatar breves considerações que afetam a manutenção através dos tratamentos contábeis de depreciação na Gestão de Ativos. Entre os objetivos específicos temos de contextualizar sobre a importância da Gestão de Ativos, da formulação da ISO 55.000 e de suas séries; descrever os principais aspectos e métodos do tratamento contábil das depreciações no ciclo de vidas dos ativos; e relacionar como a manutenção pode ser gerida e planejada considerando o tratamento contábil das depreciações na Gestão de Ativos.

A importância e relevância deste estudo se justifica diante dos "desafios da sociedade moderna em termos de gestão de ativos físicos são enormes. O crescimento econômico tem origem, fundamentalmente, no mundo em desenvolvimento, com um constante aumento na necessidade de equipamentos de produção e um aumento significativo dos custos do ciclo de vida" (Martins, 2015, p. 5). Onde a manutenção passa a ser gerida embasada em processos, estratégias e políticas que devem estar alinhadas ao tratamento contábil das depreciações; permitindo alavancagens financeiras demonstradas nos resultados patrimoniais das organizações e melhorias nas atividades manutentivas.

Quanto a metodologia trata-se de uma pesquisa de natureza básica, cujo intuito é aprimorar e produzir novos conhecimentos; ou seja, "sua finalidade básica é ressaltar o alcance e as consequências dos resultados obtidos, bem como indicar o que pode ser feito para torná-los mais significativos" (Gil, 2008, p. 183). Com relação aos objetivos metodológicos, abrange os exploratórios e explicativos, permitindo ampliar as informações e investigar os fatores já existentes. Exploratório, uma vez que, conforme Yin (2001, p. 171) "pode tratar do tema ou do problema que está sob investigação, dos métodos da investigação, das descobertas feitas a partir delas e das conclusões".

Constituindo também uma pesquisa explicativa visando os elementos da explanação embasadas em proposições teóricas e significativas.

Pois, "explicar um fenômeno significa estipular um conjunto de elos casuais em relação a ele. Esses elos são similares às variáveis independentes no uso previamente descritivo de explanações concorrentes. Na maioria dos estudos, os elos podem ser complexos e difíceis de se avaliar de uma maneira precisa" (Yin, 2001, p. 140). Onde se busca na abordagem qualitativa as interpretações dos dados; através da redução, exibição e conclusão/verificação dos dados; sabendo que está é uma das abordagens mais utilizadas, devido à sua capacidade de observação e análise dos fenômenos (GIL, 2008). Os procedimentos utilizados são, restritamente, bibliográficos, com as principais fontes de consulta em artigos, monografias, teses, sites, entre outros.

Logo, com a revisão bibliográfica é possível alcançar "um meio para atingir um fim", ou seja, permite "desenvolver questões mais exatas e incisivas acerca do tema" (YIN, 1994, p. 19 e 20). Assim, por ser considerada uma pesquisa exploratória explicativa sua complementação ocorre por meio da análise conteúdos, "uma técnica que através de uma descrição objetiva, sistemática e quantitativa do conteúdo manifesto das comunicações, tem por finalidade a interpretações destas mesmas comunicações" (Berelson, 1952 apud GIL, 2008, p. 152).

2. GESTÃO DE ATIVOS E A ISO 55.000

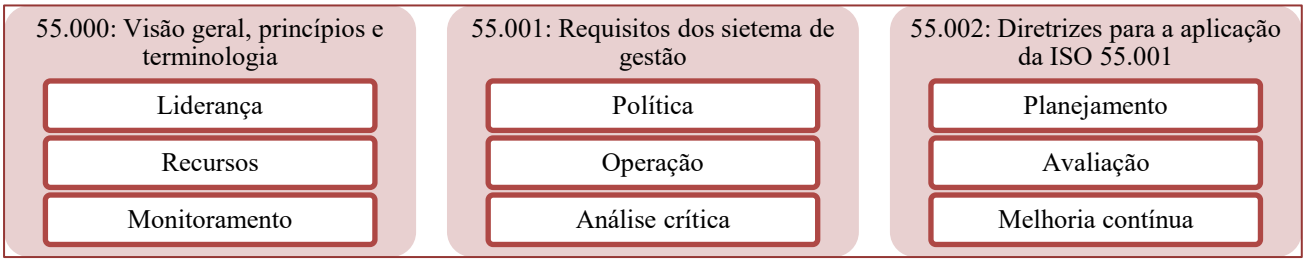
Antes de falar sobre a Gestão de Ativos faz-se importante compreender o que são os ativos. Segundo Bachtold (2011, p. 174), os ativos representam "os valores positivos do patrimônio (bens + direitos), é onde estão aplicados os recursos da empresa". Já, conforme o Comitê de Pronunciamentos Contábeis (CPC 00 - R1) (2011, p. 26 apud Machado; Lorandi, 2016, p. 3), um ativo é contextualizado como "um recurso controlado pela entidade como resultado de eventos passados e do qual se espera que fluam futuros benefícios econômicos". Logo, para caracterizar um ativo são necessários requisitos, sendo estes; "(i) constituir bem ou direito da empresa, (ii) ser propriedade, posse ou controle de longo prazo da empresa, (iii) ser mensurável monetariamente, e (iv) trazer benefícios presentes e futuros, onde estes requisitos devem ser preenchidos simultaneamente" (Bachtold, 2011, p. 175).

Neste sentido, a Gestão de Ativos se aplica a gerir bens e direitos, tornando a dimensão desta gestão holística, pois em "quase todas as atividades produtivas dependem de modo crítico dos seus ativos"; e, além disso, são impactantes nos resultados alcançados e almejados (Alegre et al, p. 2). Embora seja destacado por Martins (2015), Pereira (2016) e Woodhouse (2014) que há muitos anos se esperava a chegada da Gestão de Ativos, de modo formalizado e documentado; abrangendo um direcionamento racionalizado e a otimização da administração dos bens e direitos de uma organização, principalmente, os físicos.

Inicialmente, em 2004, o Instituto de Gestão de Ativos (IAM) e a *British Standards Institute* (BSI) lançaram uma especificação para o gerenciamento de ativos; que em 2008, foi atualizada e passou a ser denominada PAS 55 (*Public Available Specification*) para a gestão otimizada dos ativos físicos; devido a sua adoção ampla, no ano de 2009 foi apresentada a Organização Internacional de Normalização (ISO - *International Organization for Standardization*) para ser a base de um novo padrão, com a aprovação da proposta surge, em 2014, a família de normas ISO 55.000: Gestão de Ativos (Nicolay, 2015). Na Figura 1,

podemos ampliar este entendimento, considerando as normas em comparação a alguns conteúdos.

Figura 1. Normas ISO 55.000 e conteúdos



Fonte: Adaptado Zampolli (2015, p. 12).

De acordo com Alegre et al. (2015), Nicolay (2015) e Pereira (2016) a ISO 55.000 é composta pelo seguinte conjunto e estrutura: (i) ISO 55.000: Gestão de Ativos - visão geral, princípios e terminologia, que enfatiza também as definições de ativos e Gestão de Ativos; (ii) ISO 55.001: Gestão de Ativos - requisitos, que apresenta as condições necessárias e fundamentais para um sistema de Gestão de Ativos; e (iii) ISO 55.002: Gestão de Ativos - aplicações, que descreve as linhas de orientações para a aplicação da ISO 55.001, sendo um guia de implantação.

2.1. A IMPORTÂNCIA DA GESTÃO DE ATIVOS PARA A MANUTENÇÃO

A manutenção apresenta-se como uma função estratégica para as organizações, cuja responsabilidade é direta, através da disponibilidade dos ativos e dos impactos (financeiros) nos resultados alcançados (Viana, 2013). Com isso, surge ““a chamada consolidação da manutenção”, ou seja, que esse departamento desempenhe sua função estratégica, apresentando resultados sustentáveis e considerando por toda a organização como alicerce para atingir uma sólida Gestão de Ativos, faz-se necessária” (Cesário, 2017, p. 20). A importância da Gestão de Ativos para a Gestão da Manutenção se dá por ser impossível gerir ambas separadamente; a manutenção e sua eficiência administrativa interferem no ciclo de vidas dos bens, constituindo estes os precursores dos processos produtivos.

O ciclo de vida representa todas as etapas e fases envolvidas na gestão de um ativo, consistindo em um intervalo de tempo entre a necessidade e o descarte (Nicolay, 2015). A Gestão de Ativos tem como objetivo ordinário a redução do custo total da vida dos ativos, visando a gestão ótima dos sistemas de ativos físicos e seus ciclos de vida, o que decorre de uma colaboração interdisciplinar para alcançar o melhor resultado da relação qualidade (Nascif, 2015). No Quadro1 temos a representação desta relação entre as diversas áreas das organizações e as etapas da Gestão de Ativos.

Quadro 1. Participação das diversas áreas da empresa na Gestão de Ativos

Participação indireta	Operação, Manutenção, Meio Ambiente e Segurança					Engenharia, Financeiro, RH, Jurídico, Administrativo, TI (Informática), Laboratórios, etc.			
Participação direta	ENGENHARIA					OPERAÇÃO, MANUTENÇÃO e SUPRIMENTOS			
Etapas de vida dos ativos	PROJETO BÁSICO	PROJETO DETALHADO	AQUISIÇÃO E FABRICAÇÃO	INSTALAÇÃO E MONTAGEM	TREINAMENTO, COMISSIONAMENTO E PARTIDA	OPERAÇÃO MANUTENÇÃO	REFORMA UP GRADE	OPERAÇÃO MANUTENÇÃO	DESCARTE

Fonte: Adaptado de Nascif (2015, p. 4).

Podemos perceber que a participação direta da Engenharia nas fases iniciais do ciclo de vida dos ativos, principalmente na etapa de aquisição, e a manutenção ao longo da fase operacional até o seu devido descarte. Com isso, temos que a manutenção ao longo do ciclo de vida dos bens físicos deve ser direcionada, orientada e planejada, considerando as políticas e diretrizes da Gestão de Ativos, agora documentada em forma de normalização - ISO 55.000.

Segundo PAS 55 (2008), a Gestão de Ativos busca atividades coordenadas, que estão inter-relacionadas e direcionadas pelo ciclo de vidas dos bens, sendo que a atividade manutentiva ocorre em todo o ciclo e influência o custo do ciclo de vida. Este, "é o custo total de um item ao longo de sua vida, incluindo custos de aquisição, operação, manutenção e remoção" (Tabela 1) (Cesário, 2017, p. 70). Assim, a Gestão da Manutenção para a implantação da ISO 55.000 e a efetiva administração de seus ativos deve estar calçada em bases processuais, estratégicas e políticas, permitindo também o direcionamento das tomadas de decisões e melhor alocação dos esforços organizacionais.

2.2. O TRATAMENTO CONTÁBIL DAS DEPRECIAÇÕES

Para entendermos melhor sobre as depreciações precisamos, inicialmente, definir seu contexto e características. As depreciações fazem parte de uma das demonstrações financeiras e contábeis que permite analisar a evolução patrimonial, o Balanço Patrimonial, com a obrigatoriedade de apresentação desta demonstração a todas as empresas e sociedades, com exceção aos empresários rurais e microempresas. As principais contas do Balanço Patrimonial são ativos (bens e direitos), passivos (deveres e obrigações) e patrimônio líquido (capital social da empresa) (Bachtold, 2011). Sendo que tais contas são subdivididas e classificadas conforme as medidas técnicas do CPC 26 (IAS 1) (IASB, 2011). O Quadro 2 apresenta e destaca as contas do Balanço Patrimonial, com destaque na inclusão das depreciações.

Quadro 2. Estrutura contábil do Balanço Patrimonial

ATIVO (A)		PASSIVO (P)
ATIVO CIRCULANTE (AC)		PASSIVO CIRCULANTE (PC)
Disponibilidade		Contas a pagar a fornecedores
Contas a receber de clientes		Obrigações trabalhistas
Impostos a recuperar		Obrigações tributárias
Instrumentos financeiros de curto prazo		Empréstimos e financiamentos
Estoques		Provisões
Despesas do exercício seguinte		Outras dívidas de curto prazo
ATIVO NÃO CIRCULANTE (ANC)		Receitas deferidas de curto prazo
Ativo Realizável a Longo Prazo	Imobilizado	PASSIVO NÃO CIRCULANTE (PNC)
Valores a receber a longo prazo	Terrenos	Empréstimos e financiamentos de longo
Instrumentos financeiros a longo prazo	Edificações	Contas a pagar a fornecedores de longo
Créditos junto a coligadas e controladas	Máquinas e equipamentos	Contingências trabalhistas de longo prazo
Crédito junto a sócios, diretores e outros	Computadores e equipamentos	Obrigações trabalhistas deferidas
Impostos a recuperar a longo prazo	Móveis e utensílios	Provisões de longo prazo
Estoques (de longa maturação)	Veículos	Outras dívidas de longo prazo
Despesas do exercício seguinte	(-) Depreciação acumulada	Receitas deferidas de longo prazo
Investimento	Intangível	PATRIMÔNIO LÍQUIDO (PL)
Participações em coligadas	Marcas	Capital social
Participações em controladas	Patentes	(+/-) Ajustes de avaliação patrimonial
Outros investimentos permanentes	Pesquisas e desenvolvimento produtos	Reserva de lucros
(-) Provisão de perdas em investimentos	Fundos de comércio	(-) Ações em tesouraria
investimentos	(-) Amortização acumulada	(-) Prejuízos acumulados
TOTAL DO ATIVO		TOTAL PASSIVO + PL

Fonte: Adaptado de Bachtold (2011, p. 201).

Diante da análise da demonstração contábil do Balanço Patrimonial, notamos que somente os ativos imobilizados sofrem de depreciações. O ativo imobilizado consiste em um subgrupo do ativo permanente, sendo este tangível, e que segundo instruções técnicas do CPC 27 (IAS, 2009, p. 3) "é mantido para o uso da produção de fornecimento de mercadorias ou serviços, para aluguel a outros, para fins administrativos; e se espera utilizar por mais de um período".

Acrescentam Machado e Lorandi (2016, p. 3) diante da Lei nº 11.638/2007 que estende às sociedades de grande porte disposições relativas à elaboração e divulgação de Demonstrações Financeiras, ao caracterizarem os ativos imobilizados como "bens corpóreos, destinados à manutenção das atividades da empresa, considerando também os bens decorrentes de operações que transferem a entidade os beneficiários, riscos ou controle de bens". Assim, os ativos imobilizados representam os bens físicos das organizações, como terrenos, edificações, máquinas e equipamentos, computadores e periféricos, móveis e utensílios, veículos; portanto, sofrem ao longo do ciclo de vida de desgastes, e por fim, a exaustão, onde deve ocorrer seu devido descarte (IASB, 2011).

> A vida de um ativo é a mais curta dentre três aspectos diferentes, [...] vida útil (utilidade) está é a noção óbvia de vida de um equipamento, em que ele atinge um estado de desgaste que esteja além de qualquer reparo razoável; vida tecnológica (obsolência) um sistema pode tornar-se caro ou impraticável para manter ou não ter capacidade de atender à demanda atual, mesmo que ainda seja teoricamente reparável ou operável, em geral; vida econômica (custo de operação) um sistema pode ainda ser funcional, mas tornar-se muito caro para continuar em uso, por exemplo, ter elevado custo de manutenção ou de reparo (Nicolay, 2015, p. 6).

Com relação à vida útil dos ativos, temos segundo o Conselho Federal de Contabilidade (CFC, 2012) uma tabela que poderá ser utilizada como parâmetro, contendo a vida útil e o valor residual dos principais ativos imobilizados, conforme legislação em vigor. Segue na Tabela 1 a referencias de vida útil e valor residual, que equivale ao valor final do ativo, com o fim do ciclo de vida.

Tabela 1. Tabela de referência para parâmetros de depreciação/amortização

TÍTULO	VIDA ÚTIL (ANOS)	VALOR RESIDUAL (%)
Sede (edifícios)	25	10
Subsedes, salas e garagens	25	10
Móveis e utensílios de escritório	10	10
Máquinas e equipamentos	10	10
Instalações	10	10
Utensílios de copa e cozinha	10	10
Veículos (uso administrativo)	10	10
Veículos (fiscalização)	5	
Equipamentos de processamento de dados	5	10
Sistemas de processamento de dados – softwares	5	10
Biblioteca	10	0
Museu e obras de arte	-	-

Fonte: Adaptado de CFC (CFC, INT/VFCN nº 04 de 2012).

Estes aspectos influenciam as políticas para a gestão dos ativos físicos, onde cada ativo individualmente deve ser considerado, levando em conta além das características de sua vida, o seu período contábil. Como os ativos imobilizados possuem vida limitada, temos como correspondência um conjunto de períodos finitos, denominados “período contábil”; conforme forem decorrendo os períodos, geram-se os desgastes dos bens físicos, que devem ser registrados como custos e despesas contábeis (Queiroz; Goulart, 2014).

Conforme Bachtold (2011, p. 179) as depreciações diante do tratamento contábil são consideradas despesas, correspondem à “perda do valor de um bem em virtude de seu uso”; e, assim sendo, estão relacionadas com a vida do ativo, que sofre as influências dos processos, da manutenção e das políticas de gestão. Corroboram Iudícibus e Marion (2010, p. 196) ao relatarem que “o processo contábil para essa conversão gradativa do Ativo Imobilizado em Despesas chama-se Depreciação. A depreciação é uma despesa, porque todos os bens e serviços consumidos por uma empresa são despesas”. De fato, o desgaste, a obsolência, a exaustão, a desvalorização, entre outros tantos termos que se relacionam com a depreciação, produzem impactos e influenciam a evolução patrimonial.

> As recentes modificações nos procedimentos contábeis, motivadas pelo processo de convergência da contabilidade nacional aos padrões internacionais afetam significativamente as demonstrações financeiras das entidades, sejam elas públicas ou privadas. As questões relacionadas à avaliação das contas do ativo imobilizado e, não obstante, ao reconhecimento da depreciação, fazem parte desse novo contexto. Nesse sentido, o Comitê de Pronunciamentos Contábeis - CPC, instituiu o Pronunciamento Técnico 27 - Ativo Imobilizado, em consonância com as Normas Internacionais de Contabilidade - IAS 16 (Harzer; Souza, 2014, p. 76).

A depreciação deve ser vista como a diminuição da recuperabilidade do ativo, considerando tanto as políticas para a vida e ciclo do ativo como também os períodos e as análises contábeis deste; logo, parte da Gestão de Ativos um planejamento mais minucioso e atrelado aos tratamentos financeiros e contábeis. Principalmente, frente as mudanças introduzidas pelo CPC 27 (IAS, 2009) onde "todas as organizações devem calcular a depreciação de acordo com o método que melhor reflita a perda de valor econômico de determinado bem, permitindo, inclusive, fracionar o valor do bem em diferentes partes e proceder com os cálculos por critérios distintos para cada uma delas" (Harzer; Souza, 2014, p. 4); permitindo uma nova metodologia para o tratamento contábil das depreciações.

Com relação aos métodos de depreciação, além da obrigatoriedade de revisão ao final de cada exercício, o CPC 27 (IAS, 2009) incluí os seguintes métodos para a depreciação, (i) método da linha reta (linear), (ii) método dos saldos decrescentes e (iii) método das unidades produzidas. Para maior abrangência destes métodos de depreciação, segue a Tabela 2, evidenciando as características de cada método e uma exemplificação prática.

Tabela 2. Métodos de depreciação de ativos imobilizados

MÉTODO	CARACTERÍSTICA	EXEMPLO
Linha reta (linear)	Consiste em se apurar uma despesa constante durante a vida útil do ativo, caso seu valor residual não se altere. Calcula-se a depreciação através da utilização de uma taxa de desvalorização constante sobre o bem que perde o mesmo valor anualmente, considerando-se a vida útil média do bem.	Um equipamento com valor inicial do bem em 100% (0% de desgaste) de R$ 182.000,00, com sua vida útil de 5 anos, a depreciação linear do mesmo é 20% ao ano, ou seja 100/5. Ano 1: 20% x R$ 182.000,00 = R$ 36.400,00 Ano 2: 20% x R$ 182.000,00 = R$ 36.400,00 Ano 3: 20% x R$ 182.000,00 = R$ 36.400,00 Ano 4: 20% x R$ 182.000,00 = R$ 36.400,00 Ano 5: 20% x R$ 182.000,00 = R$ 36.400,00
Saldos decrescentes	O método dos saldos decrescentes resulta em despesas decrescentes durante a vida útil. A depreciação anual diminui à medida que a idade do bem aumenta. O valor da depreciação tende a ser maior no início, diminuindo gradualmente na medida em que o bem envelhece. O cálculo da depreciação obedece ao resultado da fração, onde o denominador é a soma dos dígitos da vida útil, em cada ano, multiplicado pelo valor do bem.	Um equipamento cujo custo é de R$ 182.000,00 e considerado uma vida útil atribuída de 5 anos. Soma dos dígitos: somam-se os algarismos que compõem o número de anos de vida útil do bem (1 + 2 + 3 + 4 + 5 = 15). Cálculo da depreciação: corresponde ao resultado da fração cujo denominador é a soma dos dígitos e o numerador é o número de anos restantes de vida útil do bem, em cada ano. Assim temos: Ano 1: 5/15 x R$ 182.000,00 = R$ 60.666,67 Ano 2: 4/15 x R$ 182.000,00 = R$ 48.533,33 Ano 3: 3/15 x R$ 182.000,00 = R$ 36.400,00 Ano 4: 2/15 x R$ 182.000,00 = R$ 24.266,67 Ano 5: 1/15 x R$ 182.000,00 = R$ 12.133,33
Unidades produzidas	Este método resulta em despesa baseada no uso ou produção esperada. A depreciação deve ser calculada da seguinte forma, número de unidades produzidas dividido pelo número de unidades estimadas durante a vida útil vezes 100%; com esse percentual multiplica o valor do bem.	Um equipamento cujo custo é de R$ 182.000,00 produziu 800.000 peças no primeiro ano e 1.200.000 peças no segundo ano. Durante a vida útil da máquina é estimado que a mesma produza 30.000.000 de peças. Ano 1: 800.000 / 30.000.000 x 100 = 2,67% 2,67% x R$ 182.000,00 = R$ 4.859,40 (despesa de depreciação no Ano 1) Ano 2: 1.200.000 / 30.000.000 x 100 = 4% 4% x R$ 182.000,00 = R$ 7.280,00 (despesa de depreciação no Ano 2)

Fonte: Adaptado de Greco (2010).

Desta maneira, enfatiza Goulart (2002, p. 62) que "menos esforços precisará ser empenhado para perceber o real significado da depreciação que, como método, pode até representar a alocação de custos, mas, na essência, caracteriza a perda de potencial de serviços futuros".

3. MANUTENÇÃO E TRATAMENTO CONTÁBIL DAS DEPRECIAÇÕES NA GESTÃO DE ATIVOS

Inicialmente, temos que os objetivos da Gestão de Ativos envolvem os processos, as estratégias e as políticas organizacionais, onde se faz necessário um equilíbrio entre custos, riscos e desempenho (Nicolay, 2015). Neste sentido, destaca Nascif (2015) que a missão da manutenção está baseada em aplicar as melhores práticas visando assegurar a disponibilidade dos ativos para o processo produtivo e/ou para a prestação de serviços. Com a formulação da ISO 55.000 e de suas séries passamos a ter requisitos do sistema de Gestão de Ativos, representado os elementos básicos, como (i) contexto da organização, (ii) liderança, (iii) planejamento, (iv) suporte, (v) operação e manutenção, (vi) avaliação de desempenho e (vii) melhoria (Martins, 2015; Nicolay, 2015); permanecendo estes requisitos do sistema devem ser contextualizados nos processos, nas estratégias e nas políticas de Gestão de Ativos.

Segundo Martins (2015, p. 83), a "operação e manutenção envolvem todas as atividades para manter a disponibilidade dos ativos de um modo mais eficaz, a longevidade e a capacidade (qualidade, desempenho e flexibilidade)". Estas atividades de operação e manutenção incorporadas na construção da Gestão de Ativos, relacionam-se com outras atividades e níveis organizacionais, envolvendo todas as fases do ciclo de vida de um ativo. A atividade manutentiva passou a estar envolvida com o nível estratégico, através da Gestão da Manutenção e de suas ferramentas; logo, o planejamento da manutenção deve ocorrer com o projeto de aquisição do ativo, considerando todo o ciclo de vida e as interferências das depreciações. Destacam Harzer e Souza (2014, p. 81) que "as causas que provocam a perda de um ativo são muitas". O Quadro 3 contempla as principais causas de depreciações.

Quadro 3. Causas da depreciação

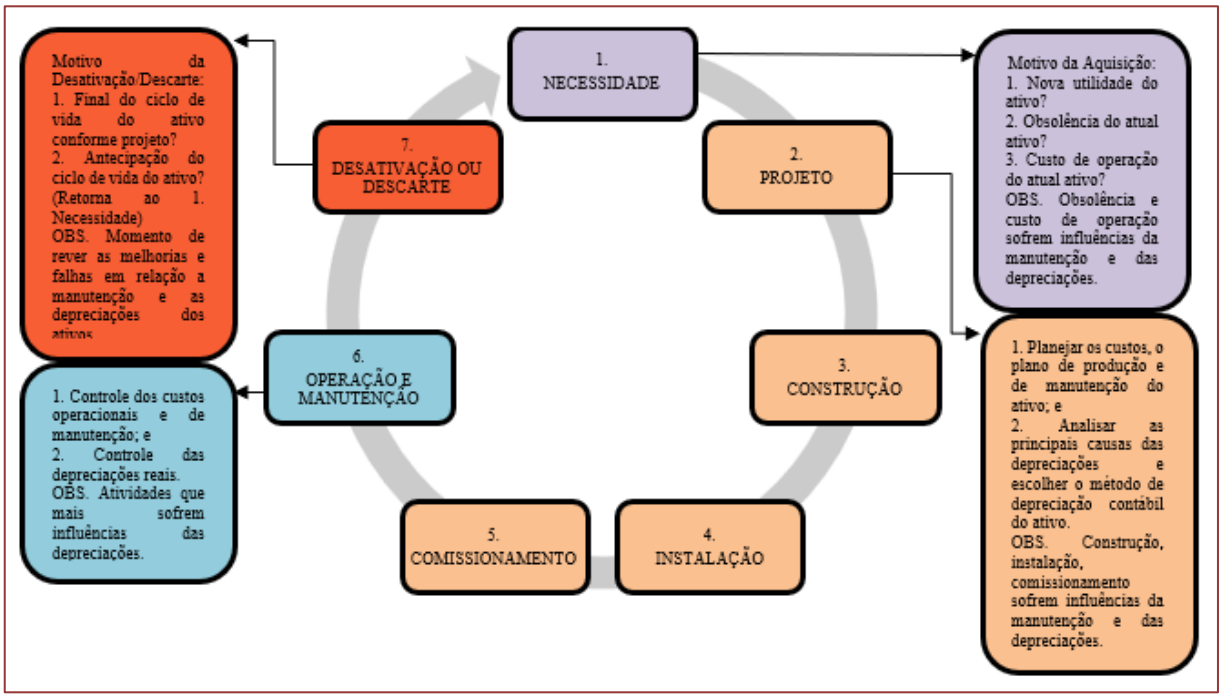
<table>
<tr><td rowspan="10">Materiais</td><td rowspan="2">Física</td><td colspan="2">Uso ou desgaste de funcionamento</td></tr>
<tr><td colspan="2">Decrepitude (ação do tempo)</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Funcional</td><td colspan="2">Desuso</td></tr>
<tr><td colspan="2">Obsolescência</td></tr>
<tr><td colspan="2">Insuficiência</td></tr>
<tr><td rowspan="5">Eventuais</td><td rowspan="3">Acidentes</td><td>Negligência</td></tr>
<tr><td>Elementos naturais</td></tr>
<tr><td>Defeitos estruturais</td></tr>
<tr><td colspan="2">Parasitas e contaminação</td></tr>
<tr><td colspan="2">Fenômenos físicos e químicos</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Não Materiais</td><td colspan="3">Renunciado</td></tr>
<tr><td colspan="3">Duração limitada</td></tr>
</table>

Fonte: Franco (1997 apud Harzer e Souza, 2014, p. 82).

Percebe-se haver muita subjetividade para o tratamento contábil das depreciações considerando a manutenção como processo holístico da Gestão de Ativos; uma vez, que

além de estar presente em todo ciclo de vida do ativo, o método escolhido para depreciar o ativo influenciará seu valor final (residual). Com base no ciclo de vida para a Gestão de Ativos, apresentado por Nicolay (2015, p. 5) e nas contextualizações teóricas acerca da manutenção e das depreciações são propostas considerações acerca destas atividades e processos, que interligadas visam uma eficiente gestão. Na Figura 2 evidenciamos as considerações sobre a manutenção e o tratamento contábil das depreciações na Gestão de Ativos.

Figura 2. Manutenção e o tratamento contábil das depreciações na Gestão de Ativos



Fonte: Elaboração da autora (2024).

Este ciclo de vida é apresentado por diversos autores, Pereira (2016), Zampolli (2015), Nascif (2015), entre outros, ocorrendo divergências entre suas etapas, mas todos buscam identificar o comportamento dos ativos frente aos processos organizacionais. O início do ciclo se dá com a necessidade, que nada mais é que o motivo ou motivos da aquisição de um novo ativo; logo, identificar as necessidades permite direcionar as tomadas de decisões frente aos impactos e as carências que a ausência deste ativo ocasiona em patamares de longo prazo. Uma vez que, toda necessidade/aquisição requer investimentos, onde o equilíbrio entre as receitas geradas e os custos mais as despesas operacionais são fundamentais para o sucesso financeiro e para a eficiência da Gestão de Ativos (Alegre et al, 2015). Analisar os fatores geradores da necessidade de aquisição permite um melhor planejamento das demais fases do ciclo.

A fase do projeto é a parte mais detalhada, envolvendo o planejamento e as previsões ao longo de todo ciclo, sendo esta fase composta por etapas, que se diferenciam conforme organizações e os ativos em específico. É no projeto e no seu detalhamento que identificamos as normas, padrões e especificações do ativo, bem como são definidas a construção, a instalação e o comissionamento necessários, onde são considerados custos

da aquisição (Zampolli, 2015). No projeto, faz-se importante a elaboração de pelo menos dois planos que contemplam uma das fases do ciclo, o Plano de Operação do Ativo, determinado pelo planejamento da produção, e o Plano de Manutenção do Ativo, apurado pelo fabricante e pelas políticas de manutenção adotadas (Cesário, 2017). A fase de projeto se encerra com a projeção do fim do ciclo de vida, onde ocorre a desativação ou descarte, sendo que esta fase deve estar minuciosamente descrita.

Ao longo do ciclo de vida de um ativo todas as fases sofrem influências e impactos da manutenção; deste a necessidade/aquisição que podem ser devido a falhas; o projeto que envolve todos os custos da manutenção, abrangendo a construção, instalação e comissionamento, bem como as manutenções destas fases; e a análise das interferências da manutenção no descarte do ativo, como melhoria para um futuro ciclo. A análise e o aprimoramento do tratamento contábil que se aplica à Gestão de Ativos é essencial para direcionar e orientar as atividades manutentivas. Considerando o desempenho, o custo e o risco como pilares para a gestão, sendo que tais também são direcionadores para as estratégias, tanto operacionais como financeiras (Martins, 2015).

A manutenção, por sua vez, para gerir seu desempenho, custos e riscos deve considerar o tratamento das depreciações (Tabela 4) e suas causas (Tabela 5); projetando-as ao longo do ciclo de vida dos ativos, de forma a determinar o melhor tratamento contábil para cada ativo antes mesmo de sua aquisição, permitindo a apreciação holística do investimento e de seu retorno. Destaca Zampolli (2015, p. 10) que “a gestão de ativos físicos resulta em uma política clara de renovação de ativos que devem ser substituídos não somente quando estão irremediavelmente danificados, pois se trata de um planejamento estratégico organizacional (financeiro e operacional). Com isso, as políticas e os controles da Gestão da Manutenção que consideram o tratamento contábil das depreciações permitirão à Gestão de Ativos mais que sua eficiência, mas o conhecimento necessário para de fato gerir os ativos.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar da normalização, não existe um caminho único para gerir os ativos, primeiramente, devido às especificações técnicas de cada bem e também devido às suas formas de utilização no processo produtivo. O que temos apesar da subjetividade em considerar na Gestão da Manutenção as depreciações e suas causas, é que um melhor conhecimento destas atividades em conjunto torna a Gestão de Ativos precursora de alavancagens financeiras, através de um maior retorno de seus investimentos. A Gestão de Ativos enfatiza que a substituição ou renovação de um ativo não ocorre somente quando este tiver um dano irreparável; mas deve-se considerar os custos operacionais e de manutenção em relação a sua substituição (vida econômica), a existência de riscos de falhas e/ou os possíveis impactos de uma falha, a obsolência e ineficiência operacionais (vida útil), além dos ganhos com a substituição do ativo (vida tecnológica), que podem ser indicadores de segurança, de sustentabilidade (meio ambiente) e de desempenho da empresa.

Portanto, a formulação dos processos, das estratégias e das políticas da Gestão de Ativos que consideram na operação e na manutenção os custos, os riscos e o desempenho precisam analisar as depreciações em todo ciclo de vida do ativo; o intuito não somente de controlar dados, mas de conter embasamento para as tomadas de decisões. Ao identificar as causas das depreciações de um ativo de forma que no planejamento de seu

projeto e de suas revisões contenham tais interferências, garante o acompanhamento real do desgaste do bem, direcionado a escolha do tratamento contábil.

REFERÊNCIAS

[1] ALEGRE, H.; BRITO, R. S.; NEVES, C.; ALMEIDA, R. Normalização na Gestão Patrimonial de Infraestruturas. XX ENEG, 2015. 14p.

[2] BACHTOLD, C. Contabilidade Básica. IF Paraná, Educação a Distância, e-Tec Brasil, Curitiba-PR, 2011. 138p.

[3] CESÁRIO, D. A. Avaliação da Maturidade no Gerenciamento da Manutenção: a Consolidação da Manutenção na Gestão de Ativos. Dissertação de Mestrado, Faculdade IETEC, Belo Horizonte, 2017. 156p.

[4] CPC 27. Ativo Imobilizado Correlação às Normas Internacionais de Contabilidade - IAS 16. CPC, 2009. 18p.

[5] CFC, INT/VFCN nº 04, 2012. Regulamentação dos Procedimentos de Depreciação e Amortização. Controladoria de Controle Interno, 2012. 20p.

[6] GIL, A. C. Métodos e Técnicas de Pesquisa Social. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008. 220p.

[7] GOULART, A. M. C. O Conceito de Ativos na Contabilidade: Um Fundamento a Ser Explorado. Revista Contabilidade & Finanças, USP, São Paulo, n. 28, 2002. pp. 56-65.

[8] GREGO, M. V. D. A Depreciação do Ativo Imobilizado: Métodos. COAD, Jusbrasil, 2010. Disponível em: https://coad.jusbrasil.com.br/noticias/2280815/a-deprecicao-do-ativo-imobilizado. Acessado em: 20 dez. 2024, às 21h 20min.

[9] HARZER, J. H.; SOUZA, A. O Impacto da Depreciação na Gestão de Custo de Uma Empresa Prestadora de Serviços Públicos de Abastecimento de Água Frente ao Pronunciamento Técnico 27 do Comitê de Pronunciamentos Contábeis. Revista Perspectivas Contemporâneas, v. 9, n. 2, 2014. pp. 75-95.

[10] IASB. Pronunciamento Técnico CPC 26 (R1). CPC, 2011. 41p.

[11] IUDÍCIBUS, S.; MARION, J. C. Contabilidade Comercial. 9. ed. São Paulo: Atlas, 2010. 464p.

[12] MACHADO, L. M.; LORANDI, J. A. Teste de recuperabilidade dos ativos: um estudo sobre à evidenciação em empresas de diferentes segmentos da BM&FBOVESPA. 1º Congresso de Contabilidade UFRGS, 2016. 17p.

[13] MARTINS, J. C. O Papel da Engenharia na Gestão de Ativos de Uma Unidade Industrial. Dissertação de Mestrado, ISEL, Departamento de Engenharia Mecânica, 2015. 187p.

[14] NASCIF, J. Manutenção e Gestão de Ativo. TECEM, 2015. 10p.

[15] NICOLAY, M. Gestão Eficaz de Ativos: PAS 55: Série ISO 55.000. Evento Automation & Power World Brasil, ABB Group, 2015. 26p.

[16] PAS 55. *What is Asset Management? Institute Of Asset Management*, [PAS 55/2008], [S. l.]: IAM, 2008. Disponível em: https://theiam.org/What-is-Asset-Management. Acessado em: 15 dez. 2024, às 17h 32min.

[17] PEREIRA, L. M. P. Gestão de Ativos: Estudo de Caso em Empresa de Telecomunicações. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016. 109p.

[18] VIANA, H. R. G. Fatores de Sucesso Para a Gestão da Manutenção de Ativos: Um Modelo Para Elaboração de Um Plano Diretor de Manutenção. Dissertação de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre, 2013. 158p.

[19] WOODHOUSE, J. ISO 55000: *What, Why and How*, *The Woodhouse Partnership*, Ltd, 2014. 37p.

[20] YIN, R. K. Pesquisa Estudo de Caso: Desenho e Métodos. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 1994.

[21] _____. Estudo de Caso: Planejamento e Métodos. Tradução Daniel Grassi. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001. 200p.

[22] ZAMPOLLI, M. Guia Básico Para Implantação da Gestão de Ativos em Empresas de Energia. ICA, 2012. 58p.

[23] _____. Guia Para a Aplicação da Norma ABNT NBR ISO 55.001. ICA, 2015. 88p.

Capítulo 3

Gestão da qualidade da água: um diagnóstico da Região Hidrográfica do Médio Paraíba do Sul

Bárbara Fontes Silva
Carin von Mühlen
Nilo Antonio de Souza Sampaio
Bianchi Nogueira Teixeira
Felipe Gomes Balbino
Hugo Pimentel Tavares

Resumo: O objetivo deste capítulo de livro é avaliar a qualidade da água na bacia hidrográfica do Médio Paraíba do Sul por meio de diagnóstico ambiental integrado, utilizando sonda multiparamétrica e análises laboratoriais, a fim de fornecer um panorama detalhado e subsidiar políticas públicas de gestão de recursos hídricos

Palavras-Chave: Diagnóstico ambiental, região do Médio Paraíba do Sul, qualidade da água, estudo.

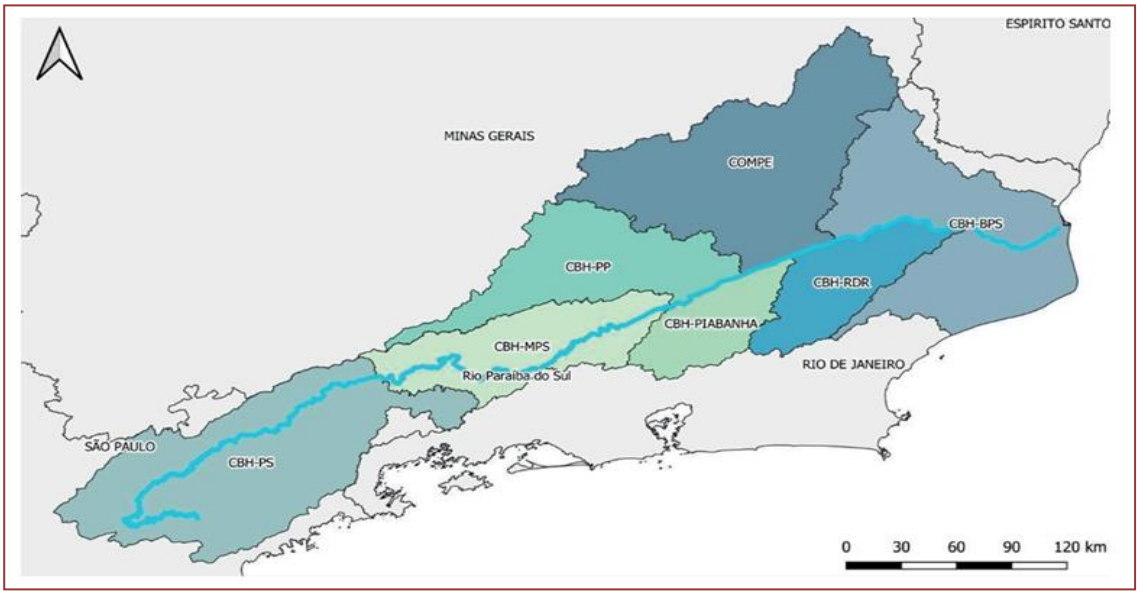
1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso essencial à vida e ao desenvolvimento socioeconômico, desempenhando papel estratégico nos processos produtivos e no bem-estar da população. No entanto, a qualidade da água tem sido progressivamente comprometida pelas pressões antrópicas, como o lançamento inadequado de efluentes industriais e domésticos, a ocupação desordenada do solo e o uso intensivo de insumos agrícolas (Tundisi & Matsumura-Tundisi, 2020). Esse cenário exige a adoção de políticas de gestão que priorizem o monitoramento sistemático da qualidade da água como instrumento fundamental para a preservação ambiental e a segurança hídrica.

A região hidrográfica do Médio Paraíba do Sul está situada em uma das áreas mais industrializadas do país, concentrando múltiplos usos dos recursos hídricos, como abastecimento público, atividades industriais e lançamento de efluentes. A intensidade desses usos tem gerado alterações significativas na dinâmica hidrológica e na qualidade das águas, especialmente em trechos urbanos (CBH-MPS, 2022).. Nesse contexto, o monitoramento ambiental torna-se essencial para o diagnóstico das condições da bacia, permitindo identificar padrões de contaminação e orientar medidas corretivas e preventivas.

A gestão da bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul é dividida entre sete comitês afluentes conforme ilustrado na Figura 1, que administram suas respectivas regiões hidrográficas, além do Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (CEIVAP). Criado em 1996, o CEIVAP tem como objetivo promover o desenvolvimento sustentável da bacia e articular a gestão dos recursos hídricos entre os estados e as regiões que a integram (CEIVAP, 2024).

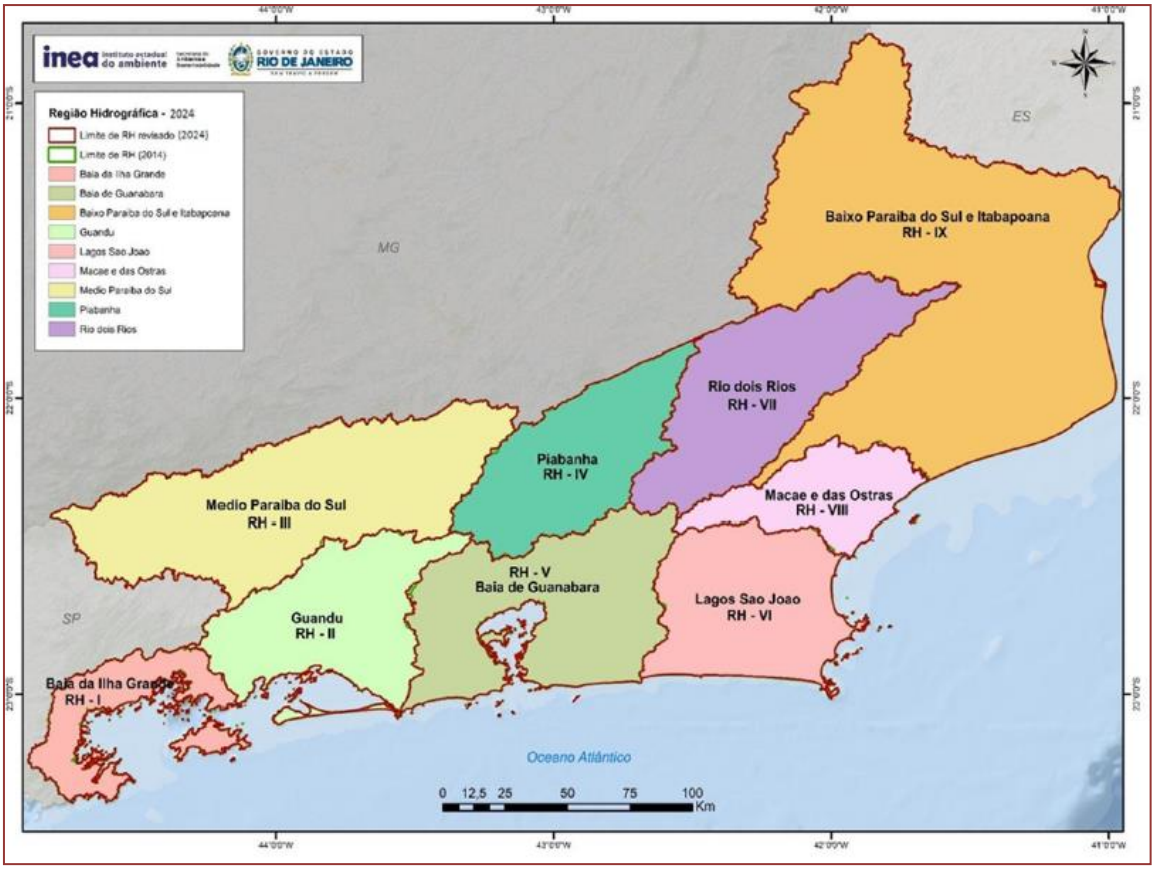
Figura 1 - Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul dividida entre os sete comitês, por região hidrográfica



Fonte: Adaptado de CBH-MPS, 2022.

No estado do Rio de Janeiro, para fins de gestão de recursos hídricos, foram definidas nove regiões hidrográficas, através da Resolução nº 107/2013 do Conselho Estadual de Recursos Hídricos do Rio de Janeiro (CERHI-RJ, 2013), dentre as quais está a Região Hidrográfica do Médio Paraíba do Sul (RH-III). A Figura 2 apresenta o mapa com os limites atuais das nove regiões hidrográficas do Estado do Rio de Janeiro.

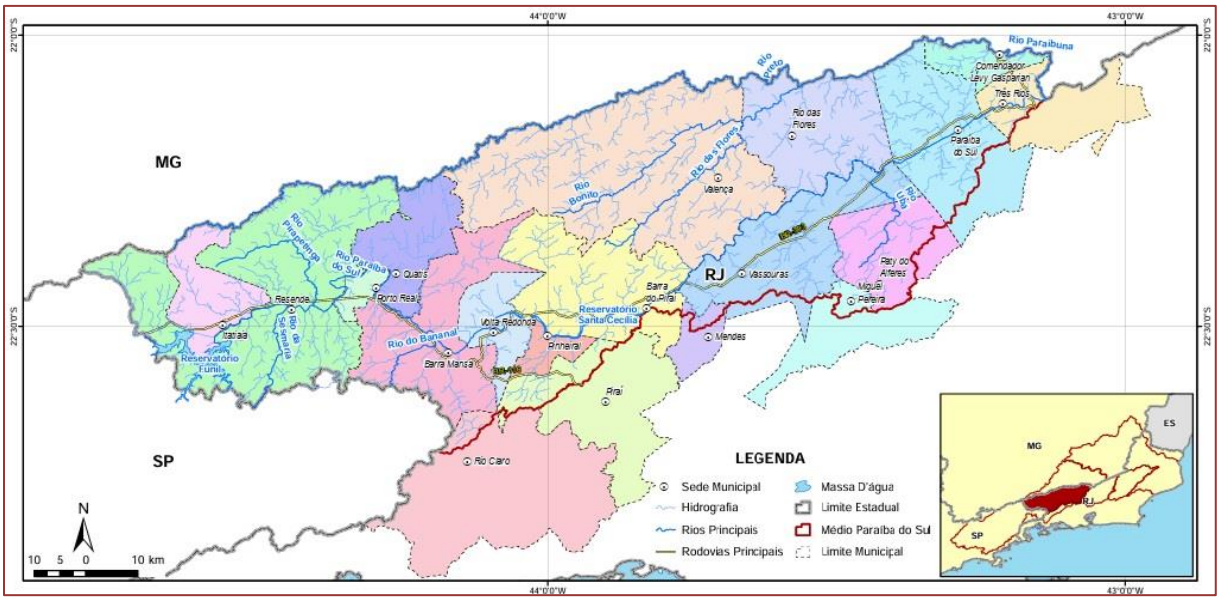
Figura 2 - Mapa das 9 Regiões Hidrográficas do Estado do Rio de Janeiro



Fonte: INEA, 2024.

A RH-III é composta por 19 municípios, sendo alguns integralmente, como Itatiaia, Resende, Porto Real, Quatis, Barra Mansa, Volta Redonda, Pinheiral, Valença, Rio das Flores e Comendador Levy Gasparian, e outros parcialmente dentro da região, como Rio Claro, Piraí, Barra do Piraí, Vassouras, Miguel Pereira, Paty do Alferes, Paraíba do Sul, Três Rios e Mendes, (CBH-MPS, 2021). A Figura 3 ilustra a localização da Região Hidrográfica III, os municípios nela contidos e seus principais rios afluentes.

Figura 3 - Localização da RH-III, municípios interceptados e seus principais rios afluentes



Fonte: Adaptado de CBH-MPS, 2021.

2. QUALIDADE DA ÁGUA E SEUS PARÂMETROS

2.1. CONCEITOS BÁSICOS

A água é um recurso natural finito e essencial para a manutenção da vida na Terra, sendo fundamental para a sobrevivência de todas as espécies. No entanto, tanto a disponibilidade quanto a qualidade hídrica estão comprometidas devido às ações humanas, que causam impactos severos ao meio ambiente, seja pelo crescimento urbano e populacional desordenado ou pelo estilo de vida não sustentável (Tundisi & Matsumura-Tundisi, 2020).

A qualidade da água é um fator determinante para a gestão de recursos hídricos, saúde pública e para a sustentabilidade ambiental. Sua avaliação é realizada por meio de diversos parâmetros físico-químicos e microbiológicos que determinam sua potabilidade e adequação para diferentes usos. No Brasil, esses padrões são regulamentados principalmente pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) e pela Portaria GM/MS nº 888/2021 do Ministério da Saúde.

Os parâmetros físico-químicos são utilizados para avaliar as propriedades da água e detectar possíveis contaminações. Dentre eles, destacam-se:

- pH: Mede a acidez ou alcalinidade da água, para águas doces deve apresentar valores de 6,0 a 9,0 (CONAMA, 2005)
- Turbidez: Indica a presença de partículas em suspensão, sendo um indicativo de qualidade e necessidade de tratamento (CONAMA, 2005).
- Condutividade elétrica: Relaciona-se à concentração de íons dissolvidos, em águas naturais indica contaminação quando acima de 100 µS (Von Sperling, 2007).

- Oxigênio dissolvido (OD): Fundamental para a manutenção da vida aquática, sendo influenciado por processos naturais e poluição orgânica (Von Sperling, 2005).
- Sólidos totais**:** refletem a turbidez e a presença de sedimentos na água (Libânio, 2010).
- Temperatura da água**:** afeta a solubilidade do oxigênio e a taxa metabólica dos organismos aquáticos (Esteves, 2011).

Os parâmetros microbiológicos são utilizados para detectar a presença de microrganismos patogênicos na água, pois representam um risco significativo à saúde humana. Os principais indicadores microbiológicos incluem:

- Coliformes totais e *Escherichia coli*: Indicadores de contaminação por esgoto nos corpos hídricos, sendo que a presença de *E. coli* indica diretamente contaminação fecal recente e em água potável é inaceitável segundo a legislação brasileira (Brasil, 2021).
- *Clostridium perfringens*: Indica contaminação fecal persistente e pode ser utilizado como parâmetro complementar de qualidade (Morris & Fernandez-Miyakawa, 2009).
- Bactérias heterotróficas: São microrganismos naturalmente presentes na água e no ambiente. Embora sua presença não indique necessariamente contaminação fecal, valores elevados podem apontar falhas nos processos de desinfecção e tratamento da água (Freire & Lima, 2013).
- Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)**:** indica a quantidade de matéria orgânica biodegradável presente na água (Von Sperling, 2005).

Além dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos, outros fatores são relevantes para a avaliação da qualidade da água, principalmente aqueles relacionados à presença de compostos químicos, que podem ter origem tanto natural quanto antrópica. Entre os principais elementos monitorados estão:

- Nitratos e nitritos: Resultantes da decomposição de matéria orgânica e do uso de fertilizantes, podendo causar a síndrome do bebê azul (Biguelini & Gumy, 2012).
- Fósforo total**:** nutriente associado à eutrofização, promove o crescimento excessivo de algas.
- Metais tóxicos (chumbo, mercúrio, cádmio): Acumulam-se no organismo e causam efeitos tóxicos, sendo regulados por limites máximos na água potável (CONAMA, 2005).
- Compostos orgânicos: Substâncias como pesticidas, fármacos, derivados de hidrocarbonetos e organoclorados são monitoradas devido à sua persistência no ambiente e toxicidade (Kumar *et al*., 2022).

2.2. ÍNDICE DE QUALIDADE DA ÁGUA (IQA):

O Índice de Qualidade da Água (IQA) é uma ferramenta amplamente utilizada para avaliar a qualidade da água de forma integrada. O IQA é um dos principais indicadores utilizados para monitoramento e classificação da qualidade da água em corpos hídricos, permitindo

classificar a água em diferentes categorias de qualidade, auxiliando na gestão e no monitoramento ambiental (CETESB, 2021).

Desenvolvido inicialmente pela National Sanitation Foundation (NSF) em 1970 e adaptado para a realidade brasileira pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), o IQA considera um conjunto de nove variáveis de qualidade da água, ponderadas de acordo com sua relevância ambiental e sanitária, entre parâmetros físico-químicos e microbiológicos que refletem a condição ambiental do recurso hídrico (CETESB, 2023): OD**,** Coliformes termotolerantes**,** pH, DBO, Temperatura da água**,** Nitrogênio total**,** Fósforo total**,** Sólidos totais e Turbidez**.**

Na fórmula do IQA original da NSF (Brown *et al*., 1970) utiliza-se o nitrogênio na forma de nitrato ao invés de nitrogênio total e cada um desses parâmetros recebe um peso, resultando em uma escala de qualidade que varia de 0 a 100, onde valores elevados indicam melhor qualidade da água (CETESB, 2023).

O INEA, Instituto Estadual do Ambiente do Rio de Janeiro, calcula o IQA com base na fórmula original da NSF, mas adapta alguns pesos para se adequar à realidade dos corpos hídricos do estado. Além disso, em virtude de problemas operacionais decorrentes dos impactos da pandemia mundial de COVID-19, o INEA realizou uma adaptação na equação substituindo o parâmetro Nitrogênio na forma de Nitrato por Nitrogênio Amoniacal, sem alterações significativas nos valores do IQA (INEA, 2022).

Outra consequência da pandemia para o cálculo do IQA foi que a partir de 2020 a CETESB passou a quantificar a matéria orgânica nos corpos hídricos utilizando a variável Carbono Orgânico Total (COT) em alternativa à DBO_5 (CETESB, 2023). A Tabela 1 apresenta os pesos atribuídos a cada variável para o cálculo do IQA segundo os diferentes institutos.

Tabela 1 – Comparação dos pesos dos parâmetros no cálculo do Índice de Qualidade da Água (IQA) segundo a NSF, CETESB e INEA

Parâmetro	Peso (NSF)	Peso (CETESB)	Peso (INEA)
Oxigênio Dissolvido (OD)	0,17	0,17	0,17
Coliformes Termotolerantes	0,15	0,15	0,16
Potencial Hidrogeniônico (pH)	0,12	0,12	0,11
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)	0,10	0,10	0,11
Temperatura da Água	0,10	0,10	0,10
Nitrogênio*	0,10	0,10	0,10
Fósforo Total	0,10	0,10	0,10
Turbidez	0,08	0,08	0,08
Sólidos Totais/Resíduo Total	0,08	0,08	0,07

*NSF=Nitratos, CETESB=Nitrogênio Total, INEA=Nitrogênio Amoniacal

Fonte: CETESB, 2023; INEA,2024.

As faixas de classificação da escala do IQA também variam entre a CETESB e o INEA e podem ser observadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Classificação do IQA

Categoria	Faixa CETESB	Faixa INEA
ÓTIMA	79 < IQA ≤ 100	90 ≤ IQA ≤ 100
BOA	51 < IQA ≤ 79	70 ≤ IQA < 90
REGULAR	36 < IQA ≤ 51	50 ≤ IQA < 70
RUIM	19 < IQA ≤ 36	25 ≤ IQA < 50
PÉSSIMA	IQA ≤ 19	0 ≤ IQA < 25

Fonte: CETESB, 2023; INEA,2024.

O uso do IQA permite a comunicação simples e objetiva da qualidade da água para gestores públicos, pesquisadores e sociedade civil. Além disso, seu monitoramento contínuo auxilia na identificação de tendências de degradação ambiental e na avaliação da eficácia de políticas de saneamento e gestão hídricas (Ana, 2024).

3. METODOLOGIA

3.1. PRIMEIRA PARTE: MONITORAMENTO COM SONDA MULTIPARAMÉTRICA

3.1.1. DEFINIÇÃO DOS PONTOS DE COLETA

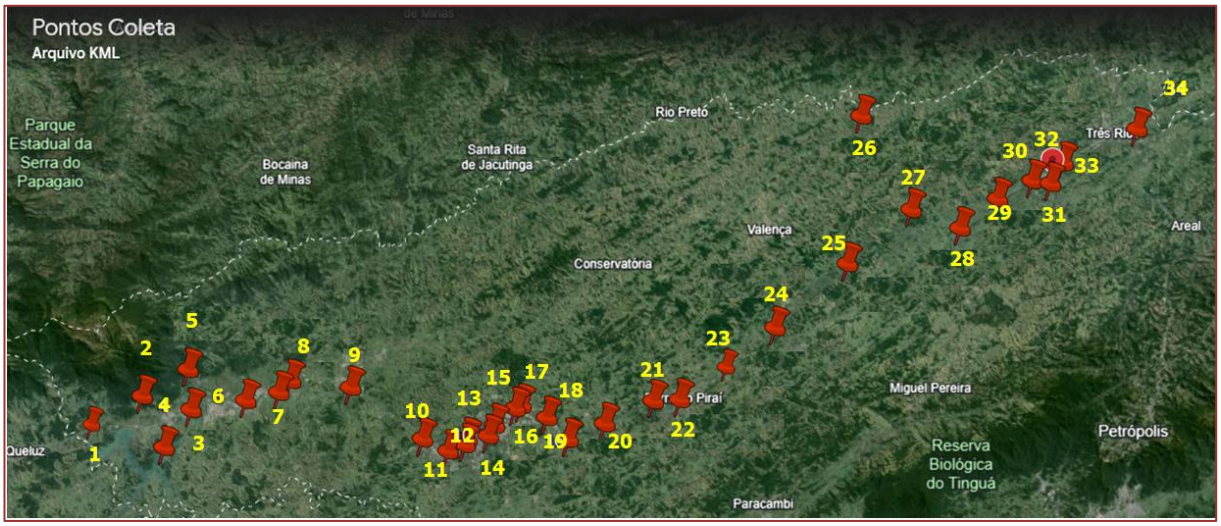
Os critérios estabelecidos para a escolha dos pontos de coleta consideraram localização e acesso, restrição de uso e alinhamento com o Plano de Bacias (CBH-MPS, 2021).

Foram indicados inicialmente 40 pontos de interesse para a gestão classificados em três categorias: pontos de referência, pontos de impacto e pontos estratégicos. Os pontos de referência apresentam mínima interferência humana e representam a condição natural de um curso hídrico, servindo para fins de comparação. Os pontos de impacto ou pontos críticos constituem a maioria da rede e servem para avaliar as alterações nas condições naturais e mensurar os impactos das atividades antrópicas. Já os pontos estratégicos possibilitam a avaliação da carga de poluentes e estão localizados em áreas de mudança de dominialidade, como rios que delimitam divisas estaduais ou municipais (Ana, 2013).

Durante o trabalho de campo, foram identificados problemas não previstos no mapeamento inicial, como dificuldades de acesso, questões de segurança, restrições de entrada em propriedades privadas e ausência de água em determinados locais. Diante dessas limitações, alguns pontos foram eliminados e outros substituídos após as duas primeiras campanhas, resultando em 34 pontos mantidos nas campanhas subsequentes.

A distribuição final dos pontos de monitoramento foi a seguinte: seis em Volta Redonda, quatro em Resende, quatro em Itatiaia, três em Barra Mansa, dois em Pinheiral, três em Barra do Piraí, cinco em Paraíba do Sul, dois em Rio das Flores, quatro em Vassouras e um em Três Rios. A Figura 4 apresenta a distribuição espacial dos pontos no mapa e a Tabela 3 detalha os 34 pontos de coleta com localização, referência e corpo hídrico.

Figura 4 – Distribuição dos 34 pontos monitorados com Sonda Multiparamétrica na RH-III



Fonte: Google Earth, 2024.

Tabela 3 – Localização, referência e corpo hídrico dos 34 pontos de Monitoramento de Qualidade da Água com a Sonda Multiparamétrica na RH-III

Ponto	Local	Referência	Corpo Hídrico	Coordenadas
1	Resende	Engenheiro Passos	Ribeirão da Água Branca	-22°29'55", -44°40'31"
2	Itatiaia	Hotel de Trânsito	Rio Campo Belo	-22°27'39" -44°35'58"
3	Itatiaia	Funil	Rio Paraíba do Sul	-22°31'42" -44°34'7"
4	Itatiaia	Hyundai	Rio Bonito	-22°28'44" -44°31'50"
5	Itatiaia	Penedo	Ribeirão das Pedras	-22.42558 -44.53413
6	Resende	Sesmarias	Rio Sesmarias	-22°28'1" -44°27'6"
7	Resende	Pirapetinga	Rio Pirapetinga	-22°27'23" -44°24'13"
8	Resende	Lagoa da Turfeira	Lagoa da Turfeira	-22°26'26" -44°23'12"
9	Barra Mansa	Quatis X Floriano	Rio Paraíba do Sul	-22°27'1" -44°18'0"
10	Barra Mansa	Rio Bananal	Rio Bananal	-22°31'7" -44°11'48"
11	Barra Mansa	Rio Barra Mansa	Rio Barra Mansa	-22°32'50" -44°9'35"
12	Volta Redonda	Ponte Alta	Rio Paraíba do Sul	-22°31'35" -44°8'8"
13	Volta Redonda	Córrego Bugio	Córrego do Bugio	-22°31'7" -44°7'58"

Tabela 3 – Localização, referência e corpo hídrico dos 34 pontos de Monitoramento de Qualidade da Água com a Sonda Multiparamétrica na RH-III (continuação)

Ponto	Local	Referência	Corpo Hídrico	Coordenadas
14	Volta Redonda	Laranjal	Ribeirão Brandão	-22°30'53" -44°6'7"
15	Volta Redonda	Aterrado	Rio Paraíba do Sul	-22°30'1" -44°5'35"
16	Volta Redonda	Escória CSN	Rio Paraíba do Sul	-22°28'43" -44°3'48"
17	Volta Redonda	Dom Bosco – Ribeirão	Ribeirão do Inferno	-22°28'26" -44°3'18"
18	Pinheiral	Parque Fluvial	Rio Paraíba do Sul	-22°29'23.7" -44°01'03.8"
19	Pinheiral	Pinheiral - Rio Cachimbal	Rio Cachimbal	-22°31'12.5" -43°59'14.9"
20	Barra do Piraí	Estrada Vargem Alegre	Rio Paraíba do Sul	-22°29'56" -43°56'4"
21	Barra do Piraí	Ponte Preta	Rio Ipiabas	-22°28'6" -43°51'53"
22	Barra do Piraí	Barra Do Piraí Centro	Rio Piraí	-22°28'1" -43°49'36"
23	Vassouras	Vassouras - Lucio Meira	Rio Paraíba do Sul	-22°25'26" -43°45'39"
24	Vassouras	Barão de Juparanã	Córrego das Mortes	-22°22'16"; -43°41'23"
25	Vassouras	Sebastião Lacerda	Rio Paraíba do Sul	-22°17'08.9"; -43°35'09.1"
26	Rio das Flores	Rio das Flores	Rio das Flores	-22°5'22"; -43°33'59"
27	Rio das Flores	Abarracamento	Rio da Divisa	-22°12'48"; -43°27'42"
28	Vassouras	Andrade Pinto – Ponte	Rio Ubá	-22°14'17"; -43°25'25"
29	Paraíba do Sul	Posto Imperador	Ribeirão da Boa Vista	-22°11'56"; -43°22'11"
30	Paraíba do Sul	Rio Chacarinha	Rio Chacarinha	-22°10'29"; -43°19'12"
31	Paraíba do Sul	Paraíba do Sul – Ponte	Córrego da Covanca	-22°10’29”; -43°19’12”
32	Paraíba do Sul	Paraíba do Sul – Pedestres	Córrego do Inema	-22°10'42"; -43°17'38"
33	Paraíba do Sul	Cerâmica	Rio da Barra do Rio Novo	-22°9'1"; -43°16'32"
34	Três Rios	Três Rios – Piracanjuba	Rio Paraíba do Sul	-22°6'17"; -43°10'7"

Fonte: Fonte: Autores, 2024.

3.1.2. CAMPANHAS DE COLETA

Foram realizadas quatro campanhas ao longo do ano de 2023, com a participação de integrantes do CBH-MPS, da equipe técnica da AGEVAP, de uma professora e de bolsistas

da UERJ. O calendário das campanhas foi elaborado de forma a abranger todas as estações do ano, permitindo a análise da variação entre os períodos de cheia e seca.

Os resultados obtidos na primeira etapa do monitoramento, por meio da Sonda Multiparamétrica YSI PRODSS, foram apresentados e discutidos com o GT-Monitoramento. Devido à distância entre os pontos, à quantidade de frascos necessários para a amostragem e à complexidade das análises, foi necessário reduzir o número de pontos de coleta.

Em alinhamento com os interesses do Projeto Modimédio, aprovado no Edital CT-Hidro de 2022 da FINEP, foram definidos 11 pontos de coleta. Desses, 6 já faziam parte do monitoramento com a sonda e 5 novos pontos foram adicionados, sendo 10 na calha principal do Rio Paraíba do Sul e 1 no afluente Campo Belo, escolhido como ponto de referência por apresentar os melhores resultados na primeira fase.

Os pontos foram distribuídos com foco na região de Volta Redonda, que foi definida como uma região com restrição de uso no Plano de Bacias da RH-III (CBH-MPS, 2021). O primeiro ponto na calha principal foi o da Represa do Funil, escolhido por representar a entrada de água na RH-III, com o objetivo de entender a qualidade com que a água chega à região.

A definição dos demais pontos seguiu o critério de avaliar o grau de contaminação de cada cidade ou região. Assim, foram alocados 2 pontos em Itatiaia, 1 em Resende, 1 na divisa entre Quatis e Porto Real, 2 em Barra Mansa e 5 em Volta Redonda, abrangendo as áreas antes, durante e após a principal indústria da cidade, a CSN. A Figura 5 apresenta a distribuição dos pontos no mapa, e a Tabela 4 detalha os pontos de coleta.

Figura 5 – Distribuição dos 11 pontos monitorados na RH-III

Fonte: Google Earth, 2024.

Tabela 4 – Localização, referência e corpo hídrico dos 11 pontos de Monitoramento de Qualidade da Água na RH-III

Ponto	Local	Referência	Corpo Hídrico	Coordenadas
1	Itatiaia	Hotel de Trânsito	Rio Campo Belo	-22°27'39" -44°35'58"
2	Itatiaia	Funil	Rio Paraíba do Sul	-22°31'42"; -44°34'7"
3	Resende	UERJ	Rio Paraíba do Sul	-22°27'12"; -44°22'12"
4	Quatis	Bom Retiro	Rio Paraíba do Sul	-22°24'07"; -44°17'22"
5	Barra Mansa	QuatisxFloriano	Rio Paraíba do Sul	-22°27'01"; -44°18'00"
6	Barra Mansa	Ponte dos Arcos	Rio Paraíba do Sul	-22°32'34"; -44°10'09"
7	Volta Redonda	Ponte Alta	Rio Paraíba do Sul	-22°31'35"; -44°08'10"
8	Volta Redonda	Passarela CSN	Rio Paraíba do Sul	-22°30'16"; -44°06'50"
9	Volta Redonda	Aterrado	Rio Paraíba do Sul	-22°30'00"; -44°05'33"
10	Volta Redonda	Ilha São João	Rio Paraíba do Sul	-22°29'21"; -44°05'13"
11	Volta Redonda	Escória CSN	Rio Paraíba do Sul	-22°28'42"; -44°03'46"

Fonte: O autor, 2024.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. RESULTADOS DAS ANÁLISES DA SONDA MULTIPARAMÉTRICA DOS 34 PONTOS

Nas campanhas com a Sonda YSI PRODSS em 2023, em função da realização das coletas em diferentes estações do ano, foi possível perceber variação dos parâmetros analisados devido aos períodos de cheia e seca e se realizar um estudo estatístico para avaliar as tendências da bacia.

Segundo o Instituto Nacional Metereológico, o INMET (2025), o regime de chuvas variou significativamente ao longo dos meses de 2023. O instituto publica dados históricos de algumas cidades do estado do Rio de Janeiro e, na RH-III, monitora a entrada e saída da região por meio dos municípios de Resende e Três Rios. A Tabela 5 apresenta os dados pluviométricos correspondentes.

Tabela 5 – Dados Pluviométricos das cidades de Resende e Três Rios em 2023

Mês	Resende (mm/mês)	Resende (mm/h)	Três Rios (mm/mês)	Três Rios (mm/h)
Janeiro	258,80	0,348	268,20	0,360
Fevereiro	160,40	0,239	198,00	0,295
Março	305,60	0,411	65,00	0,087
Abril	98,80	0,137	44,40	0,062
Maio	19,60	0,026	13,20	0,018
Junho	9,80	0,014	5,20	0,007
Julho	19,60	0,026	9,20	0,012
Agosto	39,80	0,053	48,40	0,065
Setembro	24,60	0,034	30,40	0,042
Outubro	193,80	0,260	287,00	0,386
Novembro	170,80	0,237	72,00	0,100
Dezembro	175,40	0,236	85,60	0,115
Anual	1477,00	0,168	1126,60	0,129

Fonte: INMET, 2025.

Os resultados obtidos nas quatro campanhas estão apresentados em tabelas, na Tabela 6 são mostrados os resultados para os parâmetros de pH e turbidez.

Tabela 6 – Resultados obtidos com a Sonda YSI PRODSS para os parâmetros de pH e turbidez em 2023

Ponto	pH				Turbidez (NTU)			
	1ª	2ª	3ª	4ª	1ª	2ª	3ª	4ª
1	9,62	6,76	13,97	8,19	-230,39	-73,89	1,33	5,47
2	10,89	7,05	10,33	7,44	-233,25	-76,55	0,47	1,73
3	-	6,52	13,78	8,16	-	-59,53	2,25	6,18
4	10,27	6,80	10,42	6,67	-229,17	-28,80	1,96	3,51
5	7,30	6,91	15,40	7,01	-227,90	-75,69	1,03	2,50
6	9,50	6,87	14,72	8,07	-58,45	-35,73	130,79	39,87
7	10,38	6,98	6,77	7,71	-223,01	-1,94	3,35	12,00
8	9,13	5,82	8,21	6,93	-154,10	-7,33	48,74	14,07
9	11,44	7,05	10,73	8,16	-185,98	-58,26	4,20	7,28
10	12,05	7,08	14,79	8,35	-116,59	-4,86	13,07	27,96
11	12,49	7,41	11,60	7,83	-203,09	-66,14	7,30	4,96
12	13,03	7,16	11,97	8,17	-151,49	-52,84	4,97	13,52
13	11,09	7,32	10,71	7,52	661,00	-42,64	10,98	8,83
14	11,47	7,45	10,91	7,70	-164,24	-55,23	4,78	6,30
15	10,42	7,05	13,26	8,13	-91,14	-55,07	4,95	13,00
16	9,86	7,05	8,93	7,58	-74,58	-58,94	4,37	15,10
17	-	7,37	11,91	7,62	-	-40,57	7,56	10,42
18	-	7,28	8,72	6,32	-	-60,69	5,09	20,31
19	7,27	7,74	8,42	6,36	-202,23	-34,81	4,46	29,93
20	6,99	7,30	7,48	6,17	-181,47	-59,59	4,70	23,67
21	7,43	7,71	7,73	6,68	-211,83	-64,72	48,02	24,92
22	7,15	7,43	8,03	5,89	-192,26	-59,19	5,71	231,34
23	7,00	6,87	5,60	7,05	159,24	-59,55	5,66	20,58
24	-	7,68	5,82	6,29	-	-60,19	7,09	22,53
25	7,04	7,52	5,64	6,27	-16,46	-60,22	6,11	42,42

Tabela 6 – Resultados obtidos com a Sonda YSI PRODSS para os parâmetros de pH e turbidez em 2023 (continuação)

Ponto	pH				Turbidez (NTU)			
	1ª	2ª	3ª	4ª	1ª	2ª	3ª	4ª
26	7,12	7,50	7,11	7,00	-199,83	-56,02	15,31	22,06
27	7,12	7,33	7,47	6,70	-222,42	-66,00	2,29	2,92
28	7,87	7,96	7,01	6,20	-188,68	-54,15	10,72	12,39
29	7,20	7,35	6,61	6,20	-212,48	-65,00	6,35	14,13
30	-	7,45	5,09	5,97	-	-53,97	11,92	5,79
31	7,50	7,69	6,88	6,86	-204,97	-53,67	8,85	25,56
32	7,56	7,78	7,45	8,06	-205,59	-53,34	8,02	14,48
33	7,32	7,39	5,34	6,39	-190,72	-51,75	9,67	10,24
34	7,32	7,80	7,35	6,85	3,89	-57,09	36,71	34,66

Fonte: o autor, 2023.

Como pode ser observado na Tabela 6 os parâmetros pH e turbidez apresentaram resultados fora do esperado de acordo com a literatura.

O pH é uma escala logarítmica expressa entre 0 e 14, para águas naturais a legislação CONAMA n° 357/2005 estipula valores entre 6 e 9, no entanto, nas campanhas 1 e 3 o sensor de pH apresentou falhas, variando muito os valores de leitura e não aceitando a calibração realizada antes de cada coleta. Assim, os valores encontrados nas campanhas 1 e 3 não indicam a situação real encontrada.

Nas campanhas 2 e 4 em que o sensor operou regularmente e sem falhas as variações observadas entre os pontos e as campanhas foram em virtude das diferentes estações do ano que influenciaram diretamente na mudança de temperatura da água e na carga de poluição difundido, mas sem sair da faixa entre 6 e 9 estipulada pela CONAMA n° 357/2005.

A turbidez mede o espalhamento da luz causado pela existência de partículas na água, seus valores numéricos não podem ser negativos, assim, as campanhas que apresentaram valores negativos foram em decorrência de falhas nos sensores e não apontam a situação do corpo hídrico. Nas campanhas 3 e 4, após o reset dos sensores os resultados possuem maior confiabilidade.

A sazonalidade teve uma influência significativa nos valores de turbidez observados durante as campanhas 3 e 4. Em dezembro, correspondente à quarta campanha e ao período da primavera, alguns pontos apresentaram valores elevados de turbidez devido ao aumento da precipitação. De acordo com os dados pluviométricos de 2023 da Tabela 6, os meses de outubro e dezembro registraram volumes consideráveis de chuva, com destaque para Três Rios (287,0 mm em outubro e 85,6 mm em dezembro) e Resende (193,8 mm em outubro e 175,4 mm em dezembro) (INMET, 2025). Esse aumento da precipitação eleva a vazão dos corpos d'água, promovendo a resuspensão de sedimentos do leito, além de favorecer processos de erosão e deslizamentos de encostas, aumentando a quantidade de partículas em suspensão e, consequentemente, a turbidez (Sari *et al.*, 2013).

A sazonalidade também influenciou os parâmetros de oxigênio dissolvido e condutividade, cujos resultados estão apresentados na Tabela 7. Durante as quatro campanhas de monitoramento realizadas em 2023, os sensores operaram sem falhas, garantindo a confiabilidade das medições. As variações observadas nesses parâmetros

refletem as mudanças ao longo do ano, principalmente em função dos períodos de cheia e seca, evidenciando a influência das condições climáticas na qualidade da água nos pontos analisados.

Tabela 7 – Resultados obtidos com a Sonda YSI PRODSS para os parâmetros de OD e condutividade em 2023

Ponto	Oxigênio Dissolvido (OD)								Condutividade			
	(%)				(mg.L^{-1})				(µS.cm^{-1})			
	1ª	2ª	3ª	4ª	1ª	2ª	3ª	4ª	1ª	2ª	3ª	4ª
1	93,7	95,7	99,9	97,9	8,4	8,8	8,9	8,4	15,1	14,9	27,5	23,0
2	95,7	96,2	97,1	97,8	8,9	9,1	9,2	8,7	7,6	9,5	18,5	11,1
3	-	43,8	56,6	27,2	-	3,7	5,1	2,2	-	94,8	91,4	94,4
4	92,2	91,2	91,1	91,3	8,1	8,4	8,2	7,9	16,6	25,2	49,2	23,9
5	95,9	96,7	95,9	97,8	8,4	8,7	8,6	8,8	131,8	22,9	34,0	17,5
6	86,9	85,2	75,9	88,0	7,3	7,3	6,5	7,3	48,8	52,5	61,3	55,9
7	98,0	98,7	98,9	93,6	8,1	8,6	8,7	7,9	26,9	28,3	50,3	31,1
8	14,1	15,3	22,4	6,8	1,2	1,4	2,1	0,6	26,1	69,0	45,5	65,8
9	62,3	72,0	76,1	61,1	5,1	6,2	6,8	4,9	76,8	131,0	106,3	89,7
10	89,4	89,9	79,2	83,9	7,4	7,9	6,7	6,9	65,9	60,7	95,5	86,8
11	69,8	28,6	40,0	62,0	5,6	2,4	3,2	5,1	214,1	233,5	441,4	315,6
12	88,7	84,0	95,5	77,9	7,3	7,2	8,2	6,4	125,2	86,9	90,4	88,1
13	91,2	47,3	13,1	38,0	7,7	4,2	1,1	3,2	76,3	200,9	277,6	250,9
14	74,2	71,8	53,4	63,3	6,1	6,3	4,7	5,3	181,4	246,7	349,3	295,8
15	76,6	84,5	87,9	76,4	6,3	7,2	7,7	6,3	92,9	89,8	91,3	90,5
16	70,7	77,5	85,6	73,4	5,8	6,6	7,4	6,1	128,1	95,0	115,4	62,3
17	-	78,2	67,6	73,1	-	6,9	6,2	6,3	-	109,7	128,6	125,4
18	-	84,7	87,0	75,8	-	7,3	7,5	5,9	-	96,6	95,9	97,8
19	83,0	88,7	78,0	75,7	6,8	8,3	6,9	6,0	137,7	144,2	183,8	176,8
20	80,3	84,0	84,5	74,6	6,5	7,3	7,3	5,8	83,1	94,4	97,3	100,3
21	94,5	96,4	94,5	92,3	7,5	8,9	7,9	6,9	91,1	61,3	94,7	104,6
22	63,3	64,7	43,0	17,3	5,1	6,0	3,8	1,4	157,6	138,4	156,1	165,2
23	80,5	86,7	84,5	81,6	6,7	7,6	7,5	6,4	100,1	120,6	117,8	157,6
24	-	74,3	75,2	73,6	-	6,9	6,6	5,5	-	255,2	320,6	254,7
25	85,6	92,8	92,6	84,9	7,0	8,0	8,1	6,5	94,6	100,9	104,5	103,7
26	95,8	96,7	95,8	97,3	7,9	8,8	8,5	7,5	91,3	52,6	77,0	66,9
27	94,0	95,4	94,1	88,7	7,7	8,8	8,4	6,9	126,0	52,7	156,2	76,2
28	102,4	100,3	103,1	105,4	8,1	9,2	9,1	7,8	204,7	169,1	169,2	270,4
29	95,3	96,0	94,9	91,8	8,1	9,1	8,8	7,4	48,2	36,8	51,4	54,9
30	-	98,2	95,6	94,9	-	9,2	8,7	7,4	-	38,8	51,7	58,2
31	81,9	89,5	71,8	64,6	6,9	8,5	6,5	5,1	133,6	109,4	151,5	163,7
32	84,9	88,9	74,8	69,2	7,1	8,5	6,8	5,5	181,4	124,6	182,5	277,8
33	88,0	88,5	84,1	70,7	7,40	8,38	7,64	5,66	82,60	50,23	67,0	79,11
34	89,9	12,6	55,5	93,1	7,26	1,11	4,50	6,93	96,76	388,5	730,2	109,3

Fonte: o autor, 2023.

O oxigênio dissolvido (OD) foi diretamente influenciado pelo volume de chuvas, sobretudo nos períodos de estiagem apresentando seus valores mais baixos. Como o OD é um indicador da poluição por carga orgânica, principalmente advinda do esgoto, sua variação está atrelada à vazão do corpo hídrico e à sua capacidade de autodepuração. Nos meses mais secos, a menor precipitação reduziu a diluição dos poluentes, impactando negativamente a qualidade da água.

O ponto em que se pode notar melhor o impacto do volume de água no parâmetro foi em Três Rios, no ponto 34, depois da transposição, o oxigênio dissolvido variou tanto em função da vazão que poderia ser enquadrado em Classes diferentes segundo a Resolução CONAMA n° 357/2005. Os dados pluviométricos de Três Rios em 2023 (INMET, 2025) da Tabela 6 ajudam a explicar tal variação, como o OD está diretamente ligado à vazão do corpo hídrico, faz sentido relacioná-lo não apenas à precipitação do mês da coleta, mas também ao acúmulo de chuvas nos meses anteriores, que influencia o volume de água disponível.

4.2. RESULTADOS DAS ANÁLISES DOS 11 PONTOS: IQA

Além dos parâmetros analisados com a sonda foram feitas análises laboratoriais dos outros parâmetros necessários para o cálculo do IQA. Os resultados obtidos dessas análises para os meses de julho e setembro estão disponíveis nas Tabelas 8 e 9 respectivamente.

Tabela 8 – Resultados das análises para o cálculo do IQA em Julho de 2024

PONTO	Turbidez (NTU)	Coli. Termo. (NMP/ 100 mL)	DBO ($mg.L^{-1}$)	N Total ($mg.L^{-1}$)	N-NO_3 ($mg.L^{-1}$)	N-NH_3/NH_4^+ ($mg.L^{-1}$)	P total ($mg.L^{-1}$)
1	0,04	110	3,1	0,24	0,15	0,09	0,07
2	3,22	880	6,4	1,52	1,36	0,16	0,25
3	4,35	580	4,6	1,13	0,95	0,18	0,13
4	4,21	370	4,5	1,0	0,77	0,23	0,11
5	3,78	1.100	4,9	1,10	0,81	0,29	0,14
6	5,83	1.100	5,5	1,97	1,52	0,45	0,18
7	5,44	580	5,1	1,63	1,29	0,34	0,12
8	4,75	1.100	5,2	1,38	1,16	0,22	0,15
9	5,64	660	4,5	1,10	0,94	0,16	0,09
10	5,27	350	5,0	1,30	0,88	0,42	0,11
11	4,93	470	4,4	1,24	1,03	0,21	0,10

Fonte: o autor, 2024

Tabela 9 – Resultados das análises para o cálculo do IQA em Setembro de 2024

PONTO	Turbidez (NTU)	Coli. Termo. (NMP/ 100 mL)	DBO ($mg.L^{-1}$)	N Total ($mg.L^{-1}$)	N-NO_3 ($mg.L^{-1}$)	N-NH_3/NH_4^+ ($mg.L^{-1}$)	P total ($mg.L^{-1}$)
1	0,04	43	2,8	0,36	0,26	0,10	0,05
2	11,86	960	5,4	1,34	1,12	0,22	0,18
3	9,51	450	2,0	1,11	0,86	0,25	0,08
4	8,09	580	3,5	0,84	0,69	0,15	0,09
5	7,52	880	3,2	0,94	0,75	0,19	0,12
6	12,20	1100	4,5	1,66	1,34	0,32	0,37
7	11,80	660	4,0	1,25	1,15	0,10	0,06
8	13,25	880	3,3	1,35	1,22	0,13	0,15
9	12,10	470	4,0	1,35	1,07	0,28	0,08
10	11,54	580	4,6	1,42	1,18	0,24	0,09
11	9,12	660	3,9	1,31	0,98	0,33	0,07

Fonte: o autor, 2024

Os resultados das análises para o cálculo do IQA nos meses de julho e setembro de 2024 mostraram variações significativas em diversos parâmetros monitorados, indicando possíveis influências sazonais ou impactos antrópicos nos pontos de coleta.

Segundo a CETESB (2023), embora seu cálculo do IQA permita a inclusão da temperatura por meio da curva de qualidade correspondente, essa variável só é considerada em casos de desvios significativos da temperatura de equilíbrio. Dessa forma, no cálculo da CETESB, a temperatura geralmente entra com o valor correspondente à melhor qualidade, corrigido pelo peso, resultando em 1,58. Já o INEA considera a temperatura real da água, o que pode levar a variações no subíndice e, consequentemente, impactar o IQA final.

Outra diferença metodológica relevante entre os dois índices refere-se ao tipo de nitrogênio considerado no cálculo. O INEA utiliza o nitrogênio amoniacal ($N–NH_3/NH_4^+$), geralmente presente em concentrações mais baixas, enquanto a CETESB adota o nitrogênio total, que inclui todas as formas do elemento (amoniacal, orgânico, nitrito e nitrato). Como o nitrogênio total tende a apresentar concentrações mais elevadas, os subíndices gerados para esse parâmetro são, em geral, mais baixos, o que pode reduzir o valor final do IQA calculado pela CETESB.

Além dessa diferença de parâmetro, as curvas de qualidade utilizadas para transformar as concentrações em subíndices também variam entre as instituições, assim como os pesos atribuídos a cada variável no cálculo final. No caso do nitrogênio, um subíndice mais baixo pode impactar significativamente o resultado global. Por outro lado, o uso do nitrogênio amoniacal pelo INEA tende a gerar subíndices mais elevados, contribuindo para IQAs numericamente superiores. A seguir, na Tabela 10, são apresentados os resultados obtidos a partir das duas metodologias, com a respectiva classificação da qualidade da água para os meses de julho e setembro de 2024.

Tabela 10 – Resultados do Cálculo do IQA com base na CETESB e no INEA para julho e setembro de 2024

Ponto	Julho				Setembro			
	CETESB		INEA		CETESB		INEA	
	IQA	Classificação	IQA	Classificação	IQA	Classificação	IQA	Classificação
1	89,2	Ótima	91,6	Ótima	90,5	Ótima	93,2	Ótima
2	64,8	Boa	67,9	Regular	59,7	Boa	63,1	Regular
3	72,5	Boa	74,1	Boa	70,8	Boa	73,9	Boa
4	73,8	Boa	75,4	Boa	75,3	Boa	78,5	Boa
5	70,2	Boa	71,3	Boa	72,1	Boa	75	Boa
6	62,1	Boa	65,2	Regular	60,5	Boa	65,5	Regular
7	67,4	Boa	69,5	Regular	67,3	Boa	71,2	Boa
8	64,3	Boa	68,1	Regular	58,4	Boa	62	Regular
9	70,9	Boa	74	Boa	61,9	Boa	66,3	Regular
10	66,5	Boa	69,9	Regular	62,7	Boa	67,5	Regular
11	69,2	Boa	72,5	Boa	65,1	Boa	69,8	Regular

Fonte: o autor, 2025.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve como objetivo avaliar a qualidade da água na bacia hidrográfica do Médio Paraíba do Sul por meio de um diagnóstico ambiental baseado em monitoramento com sonda multiparamétrica e análises laboratoriais complementares. A avaliação dos resultados evidenciou os impactos ambientais resultantes das atividades industriais e urbanas, ressaltando a necessidade de medidas preventivas e corretivas para mitigar os impactos negativos sobre os recursos hídricos.

O monitoramento com sonda multiparamétrica em 34 pontos permitiu diagnosticar a influência da sazonalidade sobre os parâmetros físico-químicos da água, especialmente a turbidez, o oxigênio dissolvido e a condutividade elétrica. Observou-se que os períodos chuvosos aumentaram a turbidez dos corpos hídricos, sugerindo uma maior vulnerabilidade dos mananciais a processos erosivos e ao aporte de poluentes difusos. Enquanto os períodos de estiagem reduziram os níveis de oxigênio dissolvido, com destaque para o ponto 34, em Três Rios, que apresentou variações suficientes para alterar sua classificação segundo a Resolução CONAMA n° 357/2005.

Com base nos dados obtidos, foram definidos 11 pontos para coletas pontuais destinadas a análises laboratoriais. Os parâmetros analisados foram utilizados no cálculo do Índice de Qualidade da Água (IQA), aplicando-se as metodologias da CETESB e do INEA. A comparação entre os dois métodos evidenciou divergências, reforçando a necessidade de padronização e destacando limitações do indicador na representação real da qualidade da água em áreas com grave poluição, como a provocada por esgoto, onde, apesar de alguns pontos apresentarem IQA classificado como "bom", os níveis de *Escherichia coli* e oxigênio dissolvido indicaram contaminação significativa.

Os resultados obtidos reforçam a importância do monitoramento sistemático da qualidade da água com abordagens complementares, como o uso combinado de sondas, indicadores compostos e técnicas analíticas avançadas. O estudo contribui com subsídios técnicos que podem auxiliar futuras pesquisas e a formulação de estratégias de gestão

ambiental mais eficazes, voltadas à proteção dos recursos hídricos na bacia do Médio Paraíba do Sul.

REFERENCIAS

[1] _____. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2023: informe anual. Brasília: ANA, 2024.

[2] BIGUELINI, C. P.; GUMY, M. P. Saúde Ambiental: Índices de Nitrato em Águas Subterrâneas de Poços Profundos na Região Sudoeste do Paraná. Revista Faz Ciência, v. 14, n. 20, p. 153, 2012.

[3] BROWN, R. M. *et al*. A water quality index - do we dare. Water & Sewage Works, v. 117, n. 10, p. 339-343, 1970.

[4] COMITÊ DE INTEGRAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL (CEIVAP). Disponível em: https://www.ceivap.org.br/sobre-o-comite. Acesso em: 2024.

[5] ESTEVES, F. A. Fundamentos de Limnologia. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011.

[6] KUMAR, J. A. *et al*. Persistent organic pollutants in water resources: Fate, occurrence, characterization and risk analysis. Science of The Total Environment, v. 831, 154808, 2022.

[7] LIBÂNIO, M. Fundamentos de qualidade e tratamento de água. 3. ed. Campinas: Átomo, 2010.

[8] MORRIS, W. E.; FERNANDEZ-MIYAKAWA, M. E. Toxins of Clostridium perfringens. Revista argentina de microbiologia, v. 41, n. 4, p. 251-260, 2009.

[9] SARI, V.; POLETTO, C.; CASTRO, N. M. R. Caracterização dos processos hidrossedimentológicos em bacias rurais e urbanas. Enciclopédia Biosfera, Goiânia, v. 9, n. 16, p. 597, 2013.

[10] TUNDISI, J. G. Recursos hídricos no Brasil: problemas, desafios e estratégias para o futuro. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 2014.

[11] _____. Águas do Brasil: análise estratégica. 2. ed. São Carlos: RIMA, 2018.

[12] TUNDISI, J. G.; MATSUMURA-TUNDISI, T. Limnologia. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

[13] VON MÜHLEN, C.; MANGELLI, L. N. R.; MARRIOT, P. J. Average theoretical peak time as a metric to analytical speed in one dimensional and multidimensional gas chromatographic separations. Journal of Chromatography A, v. 1667, 462887, 2022.

[14] VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2005. v. 1. 452 p.

[15] _____. Estudos de modelagem da qualidade da água de rios. Belo Horizonte: UFMG, 2007. v. 7. 452 p.

Capítulo 4

Modelagem CFD como ferramenta para otimização de sistemas de tratamento de água e efluentes: aplicações, desafios e perspectivas

Danieli Soares de Oliveira

TÓPICO 1 – INTRODUÇÃO

A crescente demanda por água de qualidade, aliada à escassez de recursos hídricos e à intensificação dos impactos das mudanças climáticas, tem impulsionado a busca por soluções inovadoras no setor de saneamento. O tratamento eficiente da água é uma etapa fundamental para garantir a saúde pública, a segurança hídrica e a sustentabilidade ambiental, especialmente em regiões com infraestrutura reduzida ou vulnerabilidade socioeconômica. Nesse contexto, o uso de ferramentas computacionais tem se consolidado como um recurso estratégico para o aprimoramento de sistemas de tratamento de água.

Entre as ferramentas mais promissoras, destaca-se a modelagem em dinâmica de fluidos computacional (CFD – *Computational Fluid Dynamics*), que permite a simulação numérica do escoamento de fluidos em diferentes condições operacionais e configurações geométricas. A modelagem CFD tem sido amplamente utilizada em engenharia ambiental e sanitária, proporcionando uma compreensão detalhada dos fenômenos hidrodinâmicos envolvidos em unidades como floculadores, decantadores, reatores biológicos e tanques de mistura.

O uso da CFD possibilita a visualização e quantificação de parâmetros como perfis de velocidade, distribuição de tempo de residência, zonas de recirculação, formação de vórtices e regiões de zonas mortas. Esses dados são essenciais para identificar gargalos operacionais e propor ajustes que elevem a eficiência dos processos, contribuindo para a melhoria da qualidade da água tratada, a redução de custos operacionais e a ampliação da capacidade de resposta dos sistemas frente a variações na carga orgânica ou hidráulica.

Além disso, a modelagem computacional se mostra particularmente vantajosa em situações em que a construção de protótipos físicos é inviável ou dispendiosa, permitindo análises preliminares seguras e baseadas em evidências. Em um cenário em que se busca aliar inovação, sustentabilidade e equidade no acesso ao saneamento, a CFD surge como uma aliada estratégica na concepção, otimização e avaliação de tecnologias de tratamento de água.

Nos próximos Tópicos, serão detalhados os aspectos técnicos da modelagem, estudos de caso aplicados a diferentes unidades de tratamento, desafios enfrentados por pesquisadores e profissionais da área, e as perspectivas futuras para a integração dessa ferramenta na gestão dos recursos hídricos.

TÓPICO 2 – FUNDAMENTOS DA MODELAGEM CFD

A dinâmica de fluidos computacional (CFD – *Computational Fluid Dynamics*) é uma área da engenharia que se dedica à simulação numérica do escoamento de fluidos, utilizando métodos matemáticos e computacionais para resolver as equações que descrevem o comportamento dos fluidos em diferentes domínios físicos. Essa ferramenta permite representar condições reais de operação em sistemas hidráulicos e ambientais, com elevado nível de detalhamento, contribuindo de forma significativa para o entendimento, dimensionamento e otimização de processos.

O fundamento central da modelagem CFD reside nas equações de Navier-Stokes, que expressam a conservação da quantidade de movimento para fluidos newtonianos. Essas equações, não lineares e de difícil solução analítica, são convertidas em sistemas algébricos por meio de métodos numéricos, possibilitando sua resolução computacional

em domínios discretizados. Além das equações de Navier-Stokes, outros princípios fundamentais são incorporados ao modelo, como a equação da continuidade — responsável por garantir a conservação da massa —, as equações de transporte de quantidade de movimento nos eixos cartesianos, a equação da energia (quando há transferência de calor envolvida), e os modelos de turbulência, que são essenciais para representar os efeitos das flutuações do escoamento em regimes não laminares. Entre os modelos de turbulência mais utilizados destacam-se o *k-ε*, *k-ω*, *Large Eddy Simulation (LES)* e *Reynolds Stress Model (RSM)*, cuja escolha depende das características do problema e da precisão desejada.

O processo de modelagem CFD segue uma sequência estruturada de etapas que compreende, em primeiro lugar, a criação da geometria tridimensional do sistema de interesse. Essa geometria é construída por meio de *softwares* de modelagem, como AutoCAD ou SolidWorks, e devem representar fielmente as unidades hidráulicas reais, como floculadores hidráulicos ou mecanizados, decantadores lamelares ou reatores biológicos. Em seguida, realiza-se a geração da malha computacional (ou malhagem), etapa que consiste na subdivisão do domínio físico em pequenos volumes de controle nos quais as equações diferenciais serão resolvidas. A qualidade da malha influencia diretamente a precisão dos resultados, sendo comum o uso de malhas estruturadas (com geometrias regulares) ou não estruturadas (com elementos como tetraedros ou prismas), conforme a complexidade geométrica da unidade simulada.

A terceira etapa envolve a definição das condições físicas e de contorno, que incluem as propriedades do fluido (como densidade e viscosidade), as condições de entrada e saída do escoamento, a definição de superfícies fixas ou móveis, simetrias, e o regime de escoamento (laminar ou turbulento). Também se estabelece, nesse momento, a seleção dos modelos matemáticos que serão empregados na simulação, como os modelos de turbulência, de escoamento multifásico ou de transporte de espécies químicas, dependendo do objetivo do estudo.

Com o problema devidamente configurado, inicia-se a etapa de solução numérica. O *software* utilizado executa a iteração das equações discretizadas ao longo da malha até que os resultados convirjam para um estado de equilíbrio numérico, respeitando critérios de tolerância e estabilidade. Diversos algoritmos de solução podem ser empregados, sendo o SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*) e o PISO (*Pressure Implicit with Splitting of Operators*) os mais recorrentes. A escolha do algoritmo depende das características do escoamento, da geometria e das propriedades do fluido.

Por fim, o pós-processamento dos resultados consiste na análise e interpretação dos dados obtidos. Essa etapa é fundamental para a geração de informações úteis ao projeto e à operação do sistema. São extraídos gráficos vetoriais, mapas de velocidade e pressão, linhas de corrente, curvas de tempo de residência, e outras representações visuais que facilitam o entendimento dos fenômenos hidrodinâmicos simulados.

No que se refere aos *softwares* utilizados para simulação CFD, há uma variedade de ferramentas disponíveis no mercado, tanto comerciais quanto de código aberto. O ANSYS Fluent é um dos mais reconhecidos, pela sua robustez, precisão e ampla aceitação na comunidade científica e industrial. O OpenFOAM, por sua vez, é uma plataforma de código aberto altamente customizável, amplamente adotada em ambientes acadêmicos e de pesquisa. O *COMSOL Multiphysics* destaca-se pela possibilidade de acoplamento entre diferentes tipos de fenômenos (fluido, calor, química, etc.), enquanto ferramentas como

CFX, SimScale e STAR-CCM+ também são utilizadas conforme a necessidade e disponibilidade de licença.

A aplicabilidade da CFD no contexto do tratamento de água é ampla e estratégica. Por meio dela, é possível simular com precisão os processos de mistura rápida, coagulação, floculação, sedimentação, filtração e desinfecção. Em cada um desses processos, a CFD permite analisar interações complexas entre o escoamento, as partículas suspensas e os dispositivos físicos que compõem as unidades hidráulicas. Essa capacidade analítica contribui para a identificação de zonas mortas, curtos-circuitos hidráulicos, padrões de mistura inadequados, e outras falhas que impactam negativamente a eficiência do sistema. A partir dessas informações, podem ser propostas modificações geométricas, ajustes operacionais e até novos conceitos de projeto, resultando em maior eficiência, menor consumo de insumos e melhor qualidade da água tratada.

Em síntese, a modelagem CFD constitui uma ferramenta indispensável para a engenharia sanitária contemporânea, permitindo que sistemas de tratamento de água sejam projetados e operados com base em evidências técnico-científicas, promovendo maior eficiência, sustentabilidade e confiabilidade nos processos.

TÓPICO 3 – APLICAÇÕES EM SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ÁGUA

A modelagem em dinâmica de fluidos computacional (CFD) tem se consolidado como uma das mais poderosas ferramentas de apoio ao diagnóstico, análise e otimização de unidades envolvidas nos sistemas de tratamento de água. Através da simulação numérica do escoamento de fluidos, é possível visualizar fenômenos hidrodinâmicos complexos, muitas vezes não acessíveis a partir de medições diretas ou observações de campo. Isso permite a identificação de deficiências operacionais, a proposta de melhorias geométricas e operacionais e o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e adaptáveis às diferentes realidades de infraestrutura.

Nos floculadores hidráulicos, como os tubulares helicoidais, a CFD tem sido utilizada para entender os padrões de escoamento interno, com destaque para os escoamentos secundários que promovem a formação de trajetórias helicoidais e a recirculação de fluidos. Essas características são fundamentais para garantir o cisalhamento ideal entre partículas, favorecendo a colisão e aglomeração em flocos sem provocar sua ruptura. A geometria desses floculadores — como o diâmetro do tubo, o passo da hélice e o número de voltas — pode ser ajustada com base em simulações, buscando uma eficiência máxima de floculação com mínima perda de carga. Em floculadores mecânicos, por sua vez, a modelagem permite avaliar o efeito da velocidade de rotação dos eixos, o formato e posicionamento das pás, e sua influência sobre a distribuição de energia no tanque, podendo reduzir significativamente o consumo energético e melhorar a eficiência da mistura.

Em decantadores, sejam eles convencionais ou de placas lamelares, a CFD possibilita uma análise detalhada dos padrões de escoamento, revelando a presença de zonas mortas, curtos-circuitos hidráulicos e fluxos preferenciais que afetam negativamente a eficiência da separação de sólidos. Ao simular diferentes configurações geométricas e condições operacionais, torna-se viável propor intervenções como a redistribuição dos canais de entrada e saída, o redimensionamento de defletores ou ajustes na inclinação das placas lamelares, com o objetivo de promover um escoamento mais uniforme e a maximização da taxa de sedimentação.

Reatores anaeróbios, em especial os do tipo UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), também têm se beneficiado das análises via CFD. Esses sistemas apresentam uma dinâmica complexa que envolve a avaliação do comportamento do manto de lodo e a separação de fases (líquido-sólido-gás). A simulação permite visualizar a interação entre as bolhas de biogás e o fluido ascendente, além de mapear regiões de baixa velocidade onde o acúmulo de lodo pode comprometer o desempenho do reator. Com base nesses dados, é possível aprimorar o dimensionamento hidráulico, prever situações de sobrecarga orgânica ou hidráulica, e orientar a manutenção preventiva com base em evidências.

Outro exemplo relevante de aplicação da CFD está nos tanques de mistura rápida, essenciais para a correta dispersão dos coagulantes. A simulação permite avaliar o tempo necessário para alcançar uma mistura homogênea, detectar zonas de estagnação ou curtos-circuitos, e propor o reposicionamento de difusores ou agitadores. Essas melhorias operacionais impactam diretamente no uso eficiente dos insumos químicos, com redução de custos e aumento da eficácia do processo de coagulação.

Além das unidades tradicionais, a CFD também vem sendo aplicada a sistemas complementares e emergentes no setor de saneamento. Em filtros rápidos, por exemplo, a simulação do escoamento através do meio granular permite identificar zonas de canalização preferencial e prever a necessidade de retrolavagem. Em tanques de contato de desinfecção, a análise da curva de tempo de residência (CTR) permite avaliar a efetividade do contato entre o desinfetante e os microrganismos. Canais e vertedores podem ser otimizados para reduzir perdas de carga, evitar erosões hidráulicas e melhorar a distribuição de vazão. Sistemas compactos e modulares, voltados para comunidades rurais ou isoladas, também têm sido projetados com base em simulações CFD, garantindo maior eficiência e adaptabilidade mesmo com recursos limitados.

Estudos de caso desenvolvidos no Brasil e no exterior reforçam a aplicabilidade da modelagem CFD em sistemas reais de tratamento de água. Pesquisas têm demonstrado sucesso na otimização do design de floculadores helicoidais, especialmente quando utilizados em conjunto com coagulantes naturais, como *Moringa oleifera* ou *Aloe vera*. Estações móveis e compactas também foram analisadas, revelando como a disposição interna dos componentes influencia diretamente no desempenho hidráulico. Reatores UASB foram simulados sob diferentes taxas de carga orgânica, revelando estratégias para evitar instabilidades e maximizar a produção de biogás. Em estações de pequeno porte, a aplicação da CFD tem orientado melhorias práticas com base em dados técnicos, inclusive com apoio de políticas públicas e programas de extensão tecnológica.

Dessa forma, a modelagem CFD não apenas permite compreender os fenômenos que ocorrem nos sistemas de tratamento de água, mas também representa uma via concreta de inovação, contribuindo para o desenvolvimento de tecnologias mais eficazes, sustentáveis e acessíveis. Ao aproximar teoria e prática, ciência e engenharia, a CFD fortalece a tomada de decisão técnica e promove soluções mais inteligentes para o desafio global de garantir água segura para todos.

TÓPICO 4 – BENEFÍCIOS DA CFD PARA O SETOR DE SANEAMENTO

A aplicação da dinâmica de fluidos computacional no setor de saneamento básico tem se mostrado uma estratégia poderosa e multifacetada, promovendo ganhos significativos desde a fase de projeto até a operação plena dos sistemas de tratamento de água. Seus

benefícios se estendem além da esfera técnica, impactando também as dimensões econômica, ambiental e social dos serviços de abastecimento, especialmente quando voltados para comunidades com infraestrutura reduzida ou com acesso limitado a tecnologias convencionais.

A principal vantagem da CFD reside em sua capacidade de fornecer uma compreensão aprofundada e visual dos fenômenos hidrodinâmicos que ocorrem no interior das unidades de tratamento. A simulação computacional permite visualizar o comportamento do escoamento em detalhes que dificilmente seriam observados por meio de métodos tradicionais. Linhas de corrente, zonas de recirculação, vórtices, regiões de escoamento morto e trajetórias preferenciais podem ser identificadas, analisadas e ajustadas. Além disso, é possível mapear os perfis de velocidade, pressão, tensões de cisalhamento e a distribuição de tempo de residência, além de avaliar o comportamento de partículas em suspensão e a dispersão de reagentes químicos. Essas informações contribuem diretamente para a tomada de decisões mais assertivas e baseadas em evidências, tanto na fase de concepção quanto na otimização de sistemas já em operação.

A CFD também permite a realização de testes virtuais que simulam diversos cenários operacionais antes da implementação física. Isso viabiliza a análise de diferentes geometrias, taxas de vazão, cargas poluentes e configurações internas sem a necessidade de alterações estruturais reais, reduzindo riscos e custos. Com base nessas simulações, é possível otimizar parâmetros como o tempo de residência hidráulica, a eficiência de mistura, a intensidade de floculação, e a taxa de remoção de turbidez e sólidos. A tecnologia ainda permite a avaliação de condições extremas, como variações sazonais na qualidade da água bruta, picos de vazão em períodos chuvosos, ou o impacto de falhas operacionais — possibilitando o desenvolvimento de sistemas mais robustos e adaptáveis.

Outro benefício estratégico da CFD está na substituição da prototipagem física por modelos virtuais. Essa substituição representa uma economia considerável em recursos financeiros e tempo, especialmente em estudos de viabilidade técnica ou projetos-piloto. Ao evitar retrabalhos em obras civis e reduzir a necessidade de ensaios laboratoriais exaustivos, a modelagem computacional permite antever comportamentos hidráulicos indesejados que poderiam comprometer a operação futura. Além disso, em unidades existentes, a simulação oferece suporte à proposição de melhorias (*retrofit*), testando, por exemplo, a introdução de defletores, ajustes na entrada e saída de fluxo, ou alterações no sistema de agitação, com baixo custo e alta confiabilidade nos resultados.

A modelagem CFD também tem se mostrado uma aliada essencial para o desenvolvimento de inovações tecnológicas. Em contextos em que a adoção de soluções tradicionais é limitada por aspectos financeiros, logísticos ou geográficos, a CFD possibilita a criação e o refinamento de sistemas compactos, modulares e replicáveis. Além disso, permite validar geometrias alternativas, materiais sustentáveis, rotas híbridas de tratamento e a aplicação de coagulantes naturais como *Moringa oleifera* ou *Aloe vera*. Isso é particularmente relevante em comunidades rurais, áreas periurbanas ou regiões afetadas por crises hídricas, onde soluções simplificadas, porém eficientes, são fundamentais para garantir o acesso à água potável.

Do ponto de vista da sustentabilidade, a CFD contribui com práticas mais responsáveis e eficientes. A possibilidade de otimizar os processos hidráulicos e físico-químicos permite reduzir o consumo de energia elétrica — frequentemente associado a sistemas de bombeamento e agitação —, além de minimizar o uso de produtos químicos. A melhoria

da qualidade da água tratada impacta diretamente na saúde pública, reduzindo a incidência de doenças de veiculação hídrica. Sistemas mais eficientes também são mais seguros, confiáveis e resilientes, capazes de operar de forma adequada mesmo diante de variações de carga ou falhas pontuais.

Por fim, cabe destacar o potencial da CFD como instrumento de democratização do conhecimento técnico. O uso crescente de *softwares* de código aberto, associado a plataformas educacionais acessíveis, tem ampliado o número de profissionais e instituições capacitados para empregar essa tecnologia. Em projetos voltados para comunidades vulneráveis, a modelagem pode ser utilizada como base técnica para justificar investimentos, orientar políticas públicas, embasar editais de fomento e fortalecer parcerias interinstitucionais. Ao colocar uma ferramenta de alta complexidade a serviço da inclusão social e da equidade no saneamento, a CFD contribui de maneira decisiva para a transformação estrutural do setor.

Em síntese, os benefícios da modelagem CFD vão muito além da simples previsão do comportamento hidráulico de sistemas. Trata-se de uma ferramenta estratégica de inovação, eficiência e sustentabilidade, que fortalece o papel da engenharia como agente de desenvolvimento social e ambiental, e que deve ser cada vez mais incorporada às práticas técnicas, acadêmicas e institucionais que orientam o planejamento e a gestão do saneamento no Brasil e no mundo.

TÓPICO 5 – DESAFIOS E LIMITAÇÕES

Embora a dinâmica de fluidos computacional (CFD) tenha se afirmado como uma ferramenta robusta e de alto valor para o setor de saneamento, sua aplicação prática ainda encontra obstáculos significativos. Esses desafios abrangem aspectos técnicos, operacionais, institucionais e até culturais, e precisam ser reconhecidos e enfrentados para que a modelagem CFD se torne uma prática mais acessível e integrada ao cotidiano da engenharia sanitária, sobretudo em contextos marcados por restrições orçamentárias, escassez de infraestrutura e carência de capacitação especializada.

Um dos entraves mais imediatos está relacionado à elevada exigência computacional envolvida nas simulações. A construção de modelos CFD com geometrias complexas, condições transientes, múltiplas fases ou com reações químicas acopladas exige *hardware* de alto desempenho, com grande capacidade de processamento, memória RAM e, muitas vezes, placas gráficas dedicadas (GPUs). Além disso, simulações com malhas refinadas e domínios extensos podem demandar horas, dias ou até semanas de processamento contínuo, exigindo máquinas dedicadas ou clusters de processamento paralelo. A depender do *software* utilizado, os custos de licenciamento comercial também se tornam proibitivos, dificultando a adoção por instituições públicas, pequenas consultorias e centros de pesquisa com orçamento limitado.

Outro desafio crítico está na complexidade técnica do processo de modelagem. Construir um modelo CFD confiável e representativo exige domínio em múltiplas áreas do conhecimento, como mecânica dos fluidos, transferência de calor e massa, análise numérica, programação computacional e familiaridade com os *softwares* de simulação. A escolha inadequada do tipo de malha, dos modelos de turbulência ou das condições de contorno pode comprometer seriamente a validade dos resultados, conduzindo a interpretações incorretas e a decisões equivocadas. Essa situação se agrava nos casos em que há acoplamento de fenômenos, como reações químicas, transporte de partículas ou

interações fluido-estrutura, exigindo ainda mais conhecimento técnico por parte do modelador.

A confiabilidade dos resultados obtidos por simulação CFD depende, de forma essencial, da sua validação experimental. No entanto, a obtenção de dados experimentais de boa qualidade, com alta resolução espacial e temporal, nem sempre é possível, principalmente em sistemas operacionais reais, que apresentam alta variabilidade e complexidade. Fatores como dificuldade de instrumentação das unidades hidráulicas, incertezas nos sensores, limitações no acesso aos dados e a variabilidade natural da qualidade da água bruta tornam a validação um processo oneroso e, em muitos casos, impreciso. A ausência dessa etapa pode comprometer a credibilidade dos modelos junto aos profissionais da área e dificultar sua aplicação prática nos processos de engenharia e tomada de decisão.

A barreira da capacitação técnica também merece destaque. Embora a CFD seja amplamente utilizada na engenharia mecânica, aeroespacial e automotiva, sua aplicação no saneamento ainda é recente e pouco difundida nos currículos de graduação em engenharia sanitária e ambiental. A escassez de profissionais com formação específica em simulação de escoamentos em unidades hidráulicas limita a internalização da CFD nas instituições públicas, operadoras de serviços, empresas de consultoria e órgãos de regulação. Mesmo entre os profissionais que possuem conhecimento básico em mecânica dos fluidos, a curva de aprendizado para dominar os *softwares* de simulação, compreender as limitações dos modelos e interpretar os resultados de forma crítica pode ser longa e desafiadora.

Mesmo nos casos em que os modelos são desenvolvidos e os resultados obtidos, há uma dificuldade recorrente na sua integração aos processos decisórios. Isso ocorre, em parte, pela forma como os dados são apresentados — muitas vezes excessivamente técnicos e pouco intuitivos — e também pela falta de envolvimento das equipes operacionais e gestoras no processo de modelagem. A distância entre quem modela e quem opera o sistema pode gerar resistência à adoção dos resultados, sobretudo em ambientes acostumados com soluções baseadas na experiência empírica ou em metodologias tradicionais. Assim, para que a CFD tenha impacto real, é necessário desenvolver estratégias de comunicação mais acessíveis, promover capacitações voltadas aos operadores e fomentar a cultura da decisão baseada em dados e simulações.

Superar esses desafios requer ações coordenadas entre universidades, centros de pesquisa, órgãos públicos, empresas e agências de fomento. Investimentos em infraestrutura computacional, formação continuada, estímulo ao uso de *softwares* de código aberto, desenvolvimento de boas práticas de modelagem e o fortalecimento de parcerias para geração de dados experimentais são passos essenciais nesse processo. Também é fundamental que a modelagem CFD seja reconhecida institucionalmente como uma ferramenta estratégica de apoio ao planejamento, projeto e operação de sistemas de saneamento, e não apenas como um recurso de pesquisa.

A democratização da CFD no setor de saneamento representa uma oportunidade concreta de inovação e transformação, especialmente em contextos de vulnerabilidade socioambiental. Ao tornar essa ferramenta mais acessível, compreensível e integrada aos processos técnicos e institucionais, amplia-se seu potencial de gerar soluções sustentáveis, adaptáveis e eficientes para os desafios relacionados ao acesso à água e à melhoria da qualidade dos serviços prestados à população.

TÓPICO 6 – PERSPECTIVAS FUTURAS

A modelagem em dinâmica de fluidos computacional (CFD) vem se consolidando como uma tecnologia-chave no aprimoramento dos sistemas de tratamento de água, especialmente em um contexto global que exige soluções cada vez mais sustentáveis, resilientes e adaptáveis às realidades locais. As tendências emergentes apontam para uma aplicação cada vez mais integrada da CFD com outras tecnologias digitais, ampliando não apenas seu alcance técnico, mas também seu impacto social e ambiental. O futuro da CFD no saneamento está fortemente vinculado à inovação, à democratização do acesso e à sua inserção em políticas públicas e estratégias de desenvolvimento.

Uma das evoluções mais promissoras no campo da simulação computacional é a integração entre a CFD e a inteligência artificial (IA), particularmente por meio de técnicas como redes neurais artificiais, algoritmos genéticos e outras abordagens de *machine learning*. A IA pode ser utilizada para automatizar a calibração de modelos, otimizar parâmetros de projeto com base em séries de simulações, prever rapidamente o comportamento de sistemas complexos a partir de bases de dados de simulação, e realizar estudos paramétricos com significativa economia de tempo computacional. Essa sinergia entre modelagem física e inteligência computacional não apenas acelera a inovação, mas também torna a CFD mais acessível a usuários que, tradicionalmente, não dominam todos os aspectos do processo de modelagem.

Outra tendência de destaque é o desenvolvimento e a adoção de gêmeos digitais (*digital twins*) no setor de saneamento. Um gêmeo digital é uma réplica virtual dinâmica de um sistema físico real, constantemente atualizada com dados de sensores e dispositivos de monitoramento. No contexto do tratamento de água, os gêmeos digitais permitem acompanhar em tempo real o desempenho hidráulico das unidades, realizar simulações preditivas para antecipar falhas, testar cenários operacionais sem interferir na planta real, e tomar decisões com base em dados integrados. Essa abordagem é especialmente útil para estações de tratamento que operam em condições variáveis ou sob exigências rigorosas de eficiência e segurança. Com a expansão da Internet das Coisas (IoT), do armazenamento em nuvem e da conectividade de dados, espera-se que os gêmeos digitais se tornem uma ferramenta comum, inclusive em unidades de pequeno porte ou descentralizadas.

A democratização da CFD é outro eixo estratégico para o futuro da tecnologia. Para garantir sua adoção em contextos com infraestrutura limitada — como comunidades rurais, municípios de pequeno porte ou países em desenvolvimento —, é fundamental investir em ferramentas de código aberto e em plataformas com interfaces gráficas amigáveis, voltadas para usuários não especialistas. A oferta de capacitações acessíveis, incluindo cursos online e conteúdos técnicos adaptados, é igualmente essencial para romper a barreira da especialização excessiva. Além disso, a criação de bibliotecas de modelos simplificados, parametrizáveis e aplicáveis a sistemas compactos e descentralizados, pode acelerar a aplicação prática da CFD em contextos reais, mesmo na ausência de grandes equipes técnicas.

A modelagem CFD também deverá desempenhar um papel central no desenvolvimento e validação de tecnologias não convencionais de tratamento de água. Entre essas, destacam-se as unidades compactas e móveis, desenhadas para atender comunidades isoladas ou regiões afetadas por emergências hídricas; os sistemas que utilizam coagulantes naturais, como os derivados da *Moringa oleifera* e do *Aloe vera*; os reatores multifuncionais que integram processos físicos, químicos e biológicos em um único módulo; e os dispositivos

projetados para enfrentar condições hidrológicas extremas, como estiagens prolongadas ou cheias repentinas. Todos esses sistemas requerem flexibilidade, adaptabilidade e eficiência, características que podem ser aperfeiçoadas com base em simulações realizadas previamente à implementação.

Ao promover a eficiência no uso dos recursos hídricos, a melhoria da qualidade da água distribuída e o fortalecimento de soluções tecnológicas sustentáveis, a modelagem CFD contribui diretamente para o cumprimento de diversos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostos pela Organização das Nações Unidas. Dentre eles, destacam-se o ODS 6 (Água potável e saneamento), o ODS 9 (Indústria, inovação e infraestrutura), o ODS 11 (Cidades e comunidades sustentáveis) e o ODS 13 (Ação contra a mudança global do clima). A incorporação da CFD em programas de inovação, projetos de extensão tecnológica e políticas públicas voltadas à universalização do saneamento reforça seu papel como ferramenta de transformação social e ambiental.

As perspectivas futuras da CFD no tratamento de água são, portanto, marcadas por três pilares fundamentais: inovação tecnológica, acessibilidade e impacto social. A convergência com outras ferramentas digitais, o fortalecimento de políticas de formação técnica, e a valorização de soluções adaptadas às realidades locais ampliarão sua presença e sua relevância nos próximos anos. Com isso, a modelagem CFD deixará de ser apenas uma ferramenta avançada de pesquisa ou projeto e se tornará um eixo estratégico para a sustentabilidade dos sistemas de saneamento, contribuindo para um futuro em que o acesso à água segura seja universal, eficiente e ambientalmente responsável.

TÓPICO 7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

A crescente complexidade dos desafios enfrentados no setor de saneamento exige abordagens inovadoras que aliem conhecimento técnico, sustentabilidade e adaptação às diferentes realidades territoriais. Nesse contexto, a modelagem em dinâmica de fluidos computacional (CFD) tem se mostrado uma ferramenta robusta e versátil para o diagnóstico, o projeto e a otimização de sistemas de tratamento de água.

Ao longo deste Tópico, foi possível demonstrar que a CFD permite compreender com profundidade os fenômenos hidrodinâmicos que ocorrem dentro de unidades de tratamento, como floculadores, decantadores, reatores e tanques de mistura. Essa compreensão se traduz em ganhos expressivos de eficiência operacional, redução de custos e melhoria na qualidade da água tratada.

A modelagem computacional contribui ainda para a prototipagem virtual, permitindo simulações que antecipam problemas e testam soluções sem a necessidade de investimentos imediatos em estruturas físicas. Isso se mostra especialmente relevante para projetos em regiões com infraestrutura reduzida, onde a tomada de decisão baseada em evidências pode representar a diferença entre o sucesso e a inviabilidade técnica de uma solução.

Apesar dos benefícios, é importante reconhecer as limitações e desafios associados ao uso da CFD, como a necessidade de validação experimental, a exigência de conhecimento técnico específico e os altos requisitos computacionais. No entanto, os avanços tecnológicos recentes, como a popularização de *softwares* de código aberto e a integração com inteligência artificial, têm ampliado o acesso a essa ferramenta e acelerado sua evolução.

As perspectivas futuras da CFD no setor de saneamento são promissoras. Com o desenvolvimento de gêmeos digitais, o uso em tempo real para gestão de sistemas e a aplicação em soluções sustentáveis e descentralizadas, a modelagem computacional se posiciona como um vetor de transformação tanto na engenharia quanto na gestão pública da água.

Por fim, ao integrar conhecimento científico, inovação tecnológica e compromisso com a sustentabilidade, a modelagem CFD fortalece o papel da engenharia no enfrentamento de um dos maiores desafios contemporâneos: garantir o acesso universal à água segura, em qualidade e quantidade adequadas, promovendo saúde, dignidade e desenvolvimento para todas as populações.

REFERÊNCIAS – TÓPICO 1

[1] DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B.; VOLTAN, P. E. N. *Métodos e técnicas de tratamento de água*. 3. ed. São Carlos: LDiBe, 2017.

[2] BRIDGEMAN, J.; JEFFERSON, B.; PARSONS, S. Computational fluid dynamics modelling of flocculation in water treatment: a review. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, v. 3, p. 220–241, 2009. DOI: https://doi.org/10.1080/19942060.2009.11015267.

[3] SHAH, J.; ŽIDONIS, A.; AGGIDIS, G. State of the art of UV water treatment technologies and hydraulic design optimisation using computational modelling. *Journal of Water Process Engineering*, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102099.

[4] DUARTE, M. et al. A review of computational modeling in wastewater treatment processes. *ACS ES&T Water*, v. 4, p. 784–804, 2023. DOI: https://doi.org/10.1021/acsestwater.3c00117.

REFERÊNCIAS – TÓPICO 2

[1] FERZIGER, J. H.; PERIĆ, M.; STREET, R. L. *Computational methods for fluid dynamics*. 4. ed. Cham: Springer, 2020.

[2] VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*. 2. ed. Harlow: Pearson Education, 2007.

[3] SAMSTAG, R. et al. CFD for wastewater treatment: an overview. *Water Science and Technology*, v. 74, n. 3, p. 549–563, 2016. DOI: https://doi.org/10.2166/wst.2016.249.

REFERÊNCIAS – TÓPICO 3

[1] BRIDGEMAN, J.; JEFFERSON, B.; PARSONS, S. The development and application of CFD models for water treatment flocculators. Advances in Engineering Software, v. 41, p. 99–109, 2010. DOI: https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2008.12.007.

[2] HÖHNE, T.; MAMEDOV, T. CFD simulation of aeration and mixing processes in a full-scale oxidation ditch. Energies, v. 13, n. 7, 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/en13071633.

[3] KARPINSKA, A.; BRIDGEMAN, J. CFD-aided modelling of activated sludge systems – a critical review. Water Research, v. 88, p. 861–879, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.11.008.

[4] NOPENS, I. et al. Water and wastewater CFD and validation: are we losing the balance? Water Science and Technology, v. 81, n. 8, p. 1636–1645, 2020. DOI: https://doi.org/10.2166/wst.2020.181.

[5] OLIVEIRA, D.; DONADEL, C. Global velocity gradient evaluation: An innovative approach using CFD modeling applied to water and wastewater treatment plants. Journal of Water Process Engineering, v. 28, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.12.009.

[6] OLIVEIRA, D.; TEIXEIRA, E. Swirl number in helically coiled tube flocculators: theoretical, experimental, and CFD modeling analysis. International Journal of Environmental Science and Technology, v. 16, p. 3735–3744, 2018. DOI: https://doi.org/10.1007/s13762-018-2027-x.

[7] OLIVEIRA, D.; TEIXEIRA, E. Hydrodynamic characterization and flocculation process in helically coiled tube flocculators: an evaluation through streamlines. International Journal of Environmental Science and Technology, v. 14, p. 2561–2574, 2017. DOI: https://doi.org/10.1007/s13762-017-1341-z.

[8] PATZIGER, M. Improving wastewater treatment plant performance by applying CFD models for design and operation: selected case studies. Water Science and Technology, v. 84, n. 2, p. 323–332, 2021. DOI: https://doi.org/10.2166/wst.2021.019.

[9] SAMSTAG, R. et al. CFD for wastewater treatment: an overview. Water Science and Technology, v. 74, n. 3, p. 549–563, 2016. DOI: https://doi.org/10.2166/wst.2016.249.

[10] ZHANG, Fanping. Integration of CFD and machine learning for application in water treatment process modeling: Membrane ozonation process evaluation. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, v. 257, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2024.105302.

REFERÊNCIAS – TÓPICO 4

[1] CAI, S.; PHINNEY, D.; HELDMAN, D.; SNYDER, A. All treatment parameters affect environmental surface sanitation efficacy, but their relative importance depends on the microbial target. *Applied and Environmental Microbiology*, v. 87, 2020. DOI: https://doi.org/10.1128/AEM.01748-20.

[2] CHAI, J. et al. Computational fluid dynamics (CFD) modeling and application for cleaning of food-contact surfaces: a review. *Journal of Food Process Engineering*, 2024. DOI: https://doi.org/10.1111/jfpe.14605.

[3] KARPINSKA, A.; BRIDGEMAN, J. CFD-aided modelling of activated sludge systems – a critical review. *Water Research*, v. 88, p. 861–879, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.11.008.

[4] PARK, S. et al. CFD simulation for designing a chlorine gaseous sanitizer treatment system. *Food and Bioproducts Processing*, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/J.FBP.2019.08.008.

[5] PATZIGER, M. Improving wastewater treatment plant performance by applying CFD models for design and operation: selected case studies. *Water Science and Technology*, v. 84, n. 2, p. 323–332, 2021. DOI: https://doi.org/10.2166/WST.2021.019.

[6] SAMSTAG, R. et al. CFD for wastewater treatment: an overview. *Water Science and Technology*, v. 74, n. 3, p. 549–563, 2016. DOI: https://doi.org/10.2166/wst.2016.249.

REFERÊNCIAS – TÓPICO 5

[1] BAGHERI, M.; MOHSENI, M. Computational fluid dynamics (CFD) modeling of VUV/UV photoreactors for water treatment. Chemical Engineering Journal, v. 256, p. 51–60, 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2014.06.068.

[2] DURAN, J.; MOHSENI, M.; TAGHIPOUR, F. Computational fluid dynamics modeling of immobilized photocatalytic reactors for water treatment. AIChE Journal, v. 57, p. 1860–1872, 2011. DOI: https://doi.org/10.1002/AIC.12399.

[3] NOPENS, I. et al. Water and wastewater CFD and validation: are we losing the balance? Water Science and Technology, v. 81, n. 8, p. 1636–1645, 2020. DOI: https://doi.org/10.2166/wst.2020.181.

[4] SOUSA, P.; RODRIGUES, C.; AFONSO, A. Enhancing CFD solver with Machine Learning techniques. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cma.2024.117133.

REFERÊNCIAS – TÓPICO 6

[1] NOPENS, I.; SUDRAWSKA, D.; AUDENAERT, W.; POZO, D.; REHMAN, U. Water and wastewater CFD

and validation: are we losing the balance? *Water Science and Technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research*, v. 81, n. 8, p. 1636–1645, 2020. DOI: https://doi.org/10.2166/wst.2020.181.

[2] OLIVEIRA, D.; DONADEL, C. Helically Coiled Tube Flocculators in Water Clarification Systems: Optimal Length Evaluation and Process Efficiency Probabilistic Analysis. *Sustainability*, v. 16, n. 5, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/su16052172.

[3] OLIVEIRA, D.; TEIXEIRA, E.; DONADEL, C. Novel approaches for predicting efficiency in helically coiled tube flocculators using regression models and artificial neural networks. *Water and Environment Journal*, v. 34, 2019. DOI: https://doi.org/10.1111/wej.12484.

[4] ZHANG, J.; TEJADA-MARTÍNEZ, A.; ZHANG, Q. Developments in computational fluid dynamics-based modeling for disinfection technologies over the last two decades: A review. *Environmental Modelling & Software*, v. 58, p. 71–85, 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/J.ENVSOFT.2014.04.003.

Capítulo 5

Reaproveitamento de cavaco de alumínio AA6060 via metalurgia do pó: uma rota alternativa e simplificada para a reciclagem

Vítor Garbo Bergamin
Bruno Nonemacher
Juliano Cantarelli Toniolo
Lisiane Trevisan

Resumo: A metalurgia do pó segue evoluindo, e como consequência, cada vez mais é utilizada para a produção das mais variadas peças, para diversas aplicações. Este processo de fabricação não convencional nos permite obter peças de geometria complexa, controlando características importantes como a liga metálica, porosidade e o desperdício de material, além de possibilitar a obtenção de materiais difíceis de se atingir com processos convencionais, como metais duros e refratários. Com o objetivo de agregar valor ao cavaco de alumínio, foi elaborada uma rota alternativa de reciclagem deste cavaco por meio de uma simplificação da metalurgia do pó. Assim, se espera que o material possa ser utilizado em aplicações que não demandem grandes esforços, e até mesmo peças artísticas e de decoração. Foram confeccionados 24 (vinte e quatro) corpos de prova da liga AA6060 seguindo esta forma simplificada de metalurgia do pó, reciclando cavaco de alumínio desta liga, e eliminando a etapa de moagem, e utilizando diferentes parâmetros: tamanho do material, carga de compactação e temperatura de sinterização. Os corpos de prova foram caracterizados quanto a densidade aparente do compactado verde e do compactado sinterizado e quanto a dureza *Shore A*.

Palavras-chave: reciclagem de alumínio, metalurgia do pó, rota alternativa para cavaco de alumínio.

1. INTRODUÇÃO

Conforme menciona Barbosa (2014), o material foi descoberto e isolado no começo do século XIX. Somente décadas depois sua aplicação passou a ser economicamente viável, após grande evolução na forma de extração. Com a diminuição dos custos de fabricação, este metal não ferroso, o alumínio, passou a ser amplamente utilizado pela indústria.

Propriedades como baixa densidade, alta resistência à corrosão, alta condutividade elétrica e baixo ponto de fusão são algumas das razões para sua larga aplicabilidade, além de sua aparência atraente. Já as favoráveis propriedades mecânicas, como resistência à tração, ductilidade, trabalhabilidade, resistência à corrosão atraem os setores aeroespacial e automotivo. O alumínio também está presente de forma significativa na indústria alimentícia, em latas para bebida, conforme menciona Cardoso (2011), devido a suas propriedades e por ser 100% reciclável, o que lhe confere diferencial dentro da família dos metais, conforme descreve Shackelford (2008).

O emprego da metalurgia do pó para a fabricação de peças de alumínio segue aumentando de forma significativa por proporcionar propriedades mecânicas necessárias, no mesmo nível dos processos metalúrgicos convencionais, conforme cita Chiaverini (2001). Por ter menor necessidade de usinagem, acabamento superficial, e manter uma boa tolerância dimensional, torna-se um processo economicamente vantajoso.

Em linhas gerais, o processo de metalurgia do pó, explicado por Rochman et *al*. (1999), inclui as etapas de obtenção do pó, processamento prévio, sua compactação a, sinterização e acabamento. Frente às técnicas metalúrgicas convencionais (como conformação e fundição), a sinterização proporciona efeitos estruturais especiais, como porosidade controlada em buchas autolubrificantes, combinação de substâncias metálicas com materiais não metálicos, controle rigoroso de composição do material, redução das impurezas presentes nas demais técnicas e de perdas de material, conforme Chiaverini (2001). Segundo Carson et *al*. (1998), graças a estas características, os fabricantes podem criar produtos mais consistentes e com comportamento previsível, além do alto grau de flexibilidade, permitindo a personalização das características físicas de determinado produto para atender às necessidades de sua aplicação.

Sendo a solução para algumas aplicações, e alternativa para outras, a metalurgia do pó apresenta vantagens frente às técnicas convencionais de fabricação. Propriedades específicas podem ser obtidas por meio da mistura de elementos, e as indústrias alimentícia, automobilística e eletrônica estão entre muitas que utilizam o processo como solução economicamente viável.

O objetivo deste trabalho foi avaliar uma rota alternativa para a reciclagem e reaproveitamento de cavacos oriundos do processo de serramento, agregando valor de forma simplificada e de baixo custo. Para isso, o processo de metalurgia do pó foi adaptado a fim de chegar em um processo que seja o mais simples possível, economicamente viável, valorizando um material que por vezes é descartado ou pouco valorizado. Foram comparados corpos de prova com diferentes parâmetros, como tamanho de cavaco, carga de compactação e temperatura de sinterização, por meio das densidades aparentes do compactado verde e do compactado sinterizado, bem como da dureza. Os resultados atingidos mostram que os parâmetros que foram variados devem ser revistos, a fim de se obter um material com propriedades mecânicas mais uniformes.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Mesmo com o contínuo avanço no desenvolvimento de materiais compósitos e alternativos que não utilizam metal, ele ainda é o principal material que está associado à engenharia, sendo as ligas ferrosas (ligas baseadas em ferro) as dominantes, que incluem aços-carbono, aços-liga e os ferros fundidos. Mais de 90% de peso dos materiais metálicos usados pelos seres humanos são ligas ferrosas. A maioria dos projetos de engenharia que exigem suporte de carga estrutural ou transmissão de energia envolve ligas ferrosas. Ainda que sejam elas as com maior aplicação em projetos de engenharia, as ligas não-ferrosas são indispensáveis, já que são capazes de fornecer características específicas e necessárias em cada caso. De acordo com Shackelford (2008), as ligas não-ferrosas são todos os metais em que o ferro não é o constituinte principal, como as ligas de alumínio, cobre, titânio, magnésio, zinco, chumbo e níquel.

2.1. ALUMÍNIO E SUAS LIGAS

Sendo um dos elementos mais abundantes na crosta terrestre, apresenta baixo ponto de fusão, a uma temperatura de 660°C, com estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC) e massa específica de 2,7g/cm^3. Segundo Callister et *al*. (2016), suas principais propriedades são a baixa densidade combinada a alta resistência, alta condutividade térmica e elétrica, alta ductilidade e resistência à corrosão.

Uma liga de alumínio é um composto químico no qual outros elementos são acrescentados ao alumínio puro para melhorar suas propriedades, principalmente a resistência mecânica. Estes outros elementos chegam a representar 15% da massa total da liga, e os principais são o ferro, silício, cobre, magnésio, manganês e zinco. A *The Aluminium Association Inc*. identifica as ligas de alumínio com um sistema de classificação chamado de *Aluminum Alloy and Temper Designation System.* Conforme explica Kaufman (2000), este sistema garante uma padronização para classificar as ligas e permite que sejam conhecidas a composição química e as características destas, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1: Sistema de designação de liga para as ligas de alumínio

Numerais	Principais elementos de liga
1XXX	Nenhum (> 99% Al)
2XXX	Cu
3XXX	Mn
4XXX	Si
5XXX	Mg
6XXX	Mg e Si
7XXX	Zn
8XXX	Outros elementos

Fonte: Adams et *al*. (1990).

O primeiro número define a principal classe, enquanto o segundo define as variações da liga base, sendo 0 (zero) para a liga original, 1 (um) para a primeira variante, 2 (dois) para a segunda variante, e assim sucessivamente. Essas variantes são normalmente definidas entre 0,15% e 0,5% de um elemento de liga presente. Os terceiro e quarto números

referem-se a liga específica da própria classe, e os números por si só não representam qualquer valor.

A série 6XXX, ligas Al-Mg-Si, é reconhecida pela alta resistência a corrosão. A liga AA6060, cuja composição é mostrada na Tabela 2, combina esta característica a uma boa resistência mecânica, e é aplicada na indústria moveleira, em chapas e perfis de caminhões, peças de máquinas e estruturas de industriais de alta resistência, Adams (1992).

Tabela 2: propriedades da liga AA6060

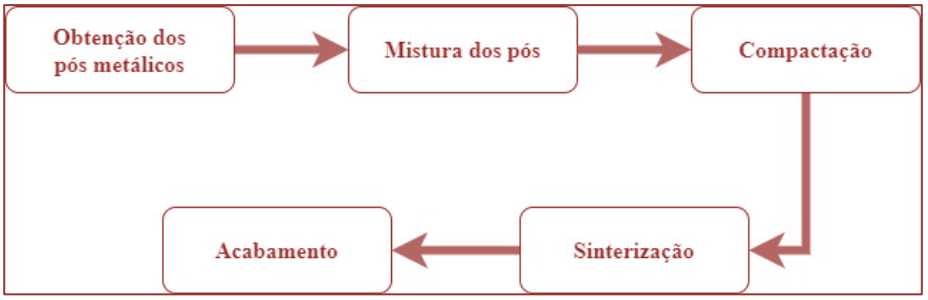
Elemento	Percentual
Silício	0,3 – 0,6
Ferro	0,1 – 0,3
Cobre	0,1
Manganês	0,1
Magnésio	0,35 – 0,6
Cromo	0,05
Zinco	0,15
Titânio	0,15
Outros	0,15
Alumínio	Restante

Fonte: Carson *et al.* (1998).

2.2. METALURGIA DO PÓ

O ato de transformar pós metálicos ou não-metálicos em peças resistentes pelo emprego apenas de pressão e calor é como a metalurgia do pó é definida por Chiaverini (2001). As etapas do processo são ilustradas pela Figura 1.

Figura 1: etapas da metalurgia do pó



Adaptado de Chiaverini (2001).

A metalurgia do pó é o processo metalúrgico que se distingue dos convencionais pelas seguintes características:

- Utilização de pós metálicos e não metálicos como matérias-primas;
- Ausência de fase líquida ou presença parcial de fase líquida durante o processo de fabricação;

- Produção de peças com formas definitivas ou praticamente definitivas, dentro de tolerâncias muito estreitas, geralmente sem necessidade de operações de usinagem posteriores ou de qualquer outro tipo de acabamento;
- Produção de componentes com características estruturais e físicos impossíveis de se obter por qualquer outro processo metalúrgico;
- Obtenção de peças em grandes séries, tornando o processo altamente competitivo em relação aos processos convencionais.

A partir dos pós, obtidos através de várias técnicas de fabricação, são duas etapas fundamentais do processo:

- Moldagem ou compactação pela aplicação de pressão nos pós, à temperatura ambiente, no interior das matrizes, cujas cavidades correspondem normalmente à forma e dimensões das peças finais;
- Aquecimento ou sinterização a uma temperatura abaixo da de fusão do metal ou liga metálica, sob condições controladas de temperatura, tempo e ambiente.

Segundo German (1984), é na etapa de aquecimento que a resistência mecânica e outras propriedades são definidas, visto que após a primeira etapa o material compactado não possui características para ser utilizado em peças e ou componentes.

As principais vantagens do processo de metalurgia do pó são:

- a possibilidade de produzir e conformar metais muito difíceis de serem obtidos por processos metalúrgicos convencionais, como metal duro e refratário;
- Obter características estruturais especiais, como porosidade controlada nos mancais auto-lubrificantes e em filtros metálicos;
- Eliminação ou drástica redução de rebarbas e excessos de material.

Com essas vantagens, o processo de metalurgia do pó passa a ser atrativo, principalmente em situação onde se tem alta exigência de propriedades mecânicas, levando em consideração também o fato de ser fácil de tratar termicamente peças obtidas por este processo.

Já as principais limitações são a quantidade de produção e a dimensão final da peça desejada. Devido ao alto custo do ferramental empregado principalmente na fase de compactação, quanto maior a quantidade a ser produzida, menor será o custo por unidade. Ainda em relação ao ferramental, se as dimensões finais do componente a ser obtido forem grandes, maiores serão as ferramentas necessárias e a força de compactação. Este desafio, porém, vem sendo superado constantemente.

2.3. PÓS METÁLICOS

Pós metálicos e não-metálicos são as matérias-primas na metalurgia do pó, e sua obtenção exige uma técnica controlada pois interfere diretamente nas propriedades do material sinterizado, conforme Kalman *et al.* (2017). Assim como mostrado na Figura 2, o tamanho das partículas, forma, distribuição de tamanho, superfície específica e densidade são algumas das propriedades que variam conforme a técnica de obtenção empregada.

Os principais métodos de obtenção de pós são:

a) Atomização: um metal é forçado a passar por um estreito orifício por jato de ar comprimido, gás inerte ou vapor, desintegrando assim a corrente líquida formada e promovendo a solidificação do metal em forma de pó.

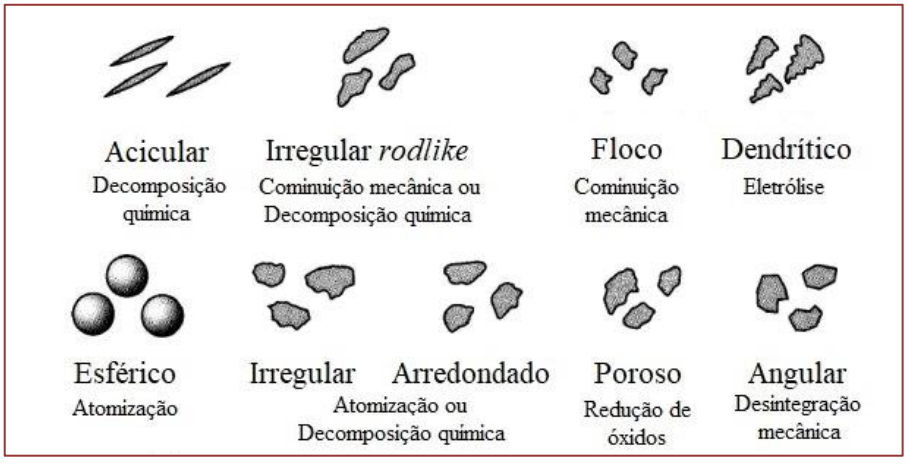
b) Deposição eletrolítica: dividida em dois métodos. Um resulta na deposição de uma camada densa, macia e quebradiça de metal que pode ser moída; a outra resulta na formação de um depósito esponjoso que pode ser desintegrado em partículas finas.

c) Decomposição térmica: consiste em decompor termicamente um composto submetendo-o a temperaturas elevadas. Normalmente parte-se de compostos gasosos e obtêm-se partículas sólidas muito finas.

d) Redução de óxido: um agente redutor gasoso ou sólido é empregado para reduzir óxidos metálicos. Este método possibilita controlar o tamanho da partícula resultante, densidade e outras características, advindas da variação da temperatura de redução e o tipo de agente redutor.

e) Processos mecânicos: consistem na redução de tamanho das partículas de um material de forma mecânica, seja por moinho de bolas, de mandíbula ou equipamento semelhante, podendo operar a seco ou a úmido. A escolha do equipamento é feita de acordo com a dureza do material e a distribuição de tamanho do particulado que se deseja obter.

Figura 2: Tipos e formas de partículas e seu processo de obtenção



Adaptado de Kamble *et al*. (2017).

2.3.1. CARACTERÍSTICAS E MISTURAS DOS PÓS

Com o nível alto de exigência sobre as matérias-primas nos processos de fabricação, é muito importante ter conhecimento sobre as características e propriedades do pó metálico. A seguir estão algumas das principais características dos pós metálicos:

a) Pureza e composição química: os pós metálicos, dependendo de sua origem, podem apresentar um nível variado de pureza. É necessário conhecer com precisão quais são suas impurezas, pois elas interferem na compactação e sinterização do pó.

b) Microestrutura das partículas: a estrutura cristalina dos pós pode exercer grande influência no seu comportamento durante a compactação e sinterização, além de

interferir nas propriedades do produto final como cita Chiaverini (2001). Divide-se em duas classes principais, a monocristalina, a qual cada partícula tem o mesmo tamanho de grão, e a policristalina, em que cada partícula apresenta um número elevado de grãos, estes, muito pequenos. No geral, estes grãos menores mesmo após a sinterização continuam com dimensões pequenas, e em estruturas policristalinas as alterações dimensionais são mais uniformes, resultando em propriedades mecânicas superiores.

c) Forma e tamanho de partícula: duas características que estão fortemente relacionadas e que são as mais importantes nos pós metálicos. A maioria dos pós apresenta uma forma irregular, conforme apresentados na Figura 1. Tendo em vista a compactação, partículas com forma irregular apresentam melhores características de compactação, pois entre elas existe uma maior interação entre os contornos. Geralmente o tamanho das partículas é representado por diâmetro, e o método mais comum para se determinar o tamanho e a distribuição de tamanho de partículas é o peneiramento. Uma maneira menos comum, porém mais eficiente, é a microscopia, em que cada partícula pode ser medida individualmente.

d) Porosidade: os poros, quando presentes, impactam diretamente a densidade e a compressibilidade da peça final, além da porosidade em si. Os dois tipos de porosidade se diferenciam pelos poros estarem ou não ligados entre si.

Já a mistura é a operação em que dois ou mais pós são intimamente misturados, em caso da utilização de mais de um elemento ou mais de uma liga. Homogeneização é a classificação para a mistura de pós com composição idêntica. Silva (1996) cita que quanto mais uniforme for o tamanho das partículas, maior é a possibilidade de atingirmos resultados uniformes em relação às propriedades mecânicas.

2.3.2. COMPACTAÇÃO

Com exceção de alguns produtos, como filtros metálicos, em que o processo é feito sem pressão, a compactação se resume na aplicação de pressão unidirecional, seja de ação simples ou dupla. Esta etapa tem objetivo de estabelecer dimensões mais próximas possíveis do componente final desejado já levando em consideração as variações dimensionais eventuais na etapa de sinterização, e atingir níveis adequados de porosidade e resistência mecânica para as etapas seguintes. Segundo Iervolino (2009), ao passar por estas fases, a peça muitas vezes próxima às suas dimensões finais, recebe o nome de compactado verde.

Alguns fatores acerca da compactação podem impossibilitar seu emprego como processo de fabricação, a limitação da forma da peça, atrito entre as partículas do pó e as superfícies do ferramental. Como explica Gomes (1993), cada peça precisa ser criteriosamente analisada ao se projetar o ferramental para a compactação. As características e propriedades tanto do pó quanto da peça final são levadas em consideração para que as ferramentas necessárias estejam condizentes, não somente em capacidade como em durabilidade.

2.3.4. SINTERIZAÇÃO

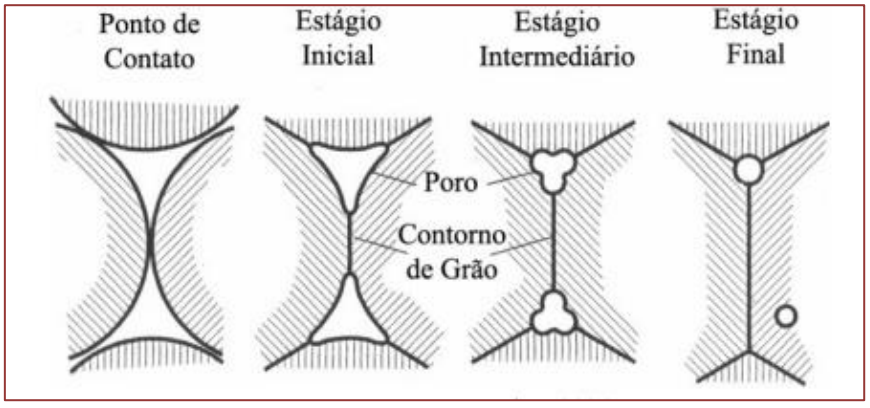
A sinterização consiste no aquecimento dos compactados verdes a temperaturas elevadas, abaixo do ponto de fusão do principal elemento da liga metálica, sob condições

controladas de tempo, temperatura e atmosfera. Chiaverini (2001) explica que a temperatura de sinterização é da ordem de 2/3 a 3/4 da temperatura de fusão da liga considerada. Existem casos pontuais em que a temperatura de sinterização é superior à do metal de menor ponto de fusão, quando há vários elementos presentes, que é a sinterização por fase líquida.

Mesmo sendo um processo simples, exige controle rigoroso das variáveis que interferem na formação da liga, como a temperatura. Um pequeno aumento de temperatura, bem como o tempo que o material é submetido a ela, pode alterar significativamente o grau de ligação das partículas. Já a atmosfera do forno, segundo Loberto *et al.* (2009), tem a função principal de evitar ou minimizar a oxidação e qualquer outra reação química entre o compactado verde e o meio ambiente, além de remover impurezas presentes na superfície e no interior do compactado (visto sua porosidade) e aumentar a transferência de calor, permitindo maiores taxas de aquecimento e resfriamento.

Os estágios do processo de sinterização começam no desenvolvimento das ligações químicas por difusão atômicas entre grãos vizinhos, formando a região do pescoço, assim mostrado por Consentino (2006). Neste estágio não há variação dimensional e o grau de coesão é alto. Conforme a temperatura sobe, as superfícies de ligação aumentam, a região do pescoço cresce, e mesmo com o transporte de material, ainda não há variação dimensional. Na próxima etapa os poros começam a se fechar, o que pode levar a peça a deformar, seja contraindo ou expandindo. Com mais temperatura os poros se contraem e a peça diminui de volume, e aumentam suas propriedades mecânicas. Na última etapa ocorre o coalescimento e o crescimento dos poros maiores, enquanto os poros menores e isolados são eliminados. As etapas da sinterização são ilustradas pela Figura 3.

Figura 3: Representação esquemática dos estágios de sinterização: inicial, intermediário e final



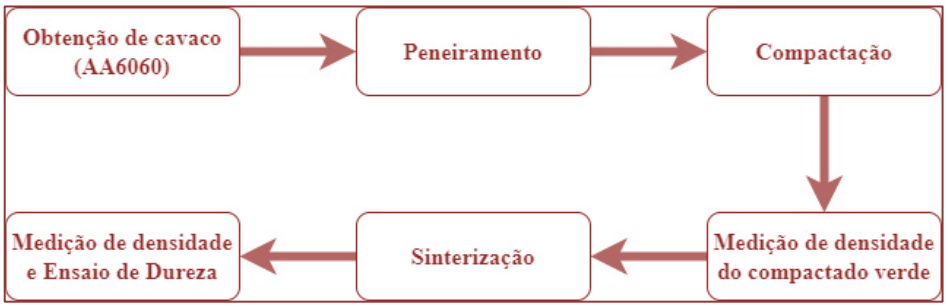
Fonte: Consentino (2006).

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O fluxograma da Figura 4 ilustra as etapas do procedimento experimental realizado. Foram confeccionadas 12 combinações diferentes de tamanho médio de cavaco (0,850 mm, 0,425 mm e 0,212 mm), carga de compactação (200MPa e 300MPa) e temperatura de sinterização (400°C e 500°C), com 2 corpos de prova para cada, totalizando 24

amostras. As combinações dos parâmetros de cada corpo de prova são apresentadas pela Tabela 3.

Figura 4: Fluxograma do procedimento experimental



Fonte: Autor.

Tabela 3: parâmetros dos corpos de prova confeccionados

Corpo de prova	Carga [MPa]	Temperatura de Sinterização [°C]	Peneira [Tyler, mm]
CP1A e CP1B	**200**	400	35# ou 0,425mm
CP2A e CP2B	**300**	400	35# ou 0,425mm
CP3A e CP2B	**200**	500	35# ou 0,425mm
CP4A e CP4B	**300**	500	35# ou 0,425mm
CP5A e CP5B	**200**	400	20# ou 0,850mm
CP6A e CP6B	**300**	400	20# ou 0,850mm
CP7A e CP7B	**200**	500	20# ou 0,850mm
CP8A e CP8B	**300**	500	20# ou 0,850mm
CP9A e CP9B	**200**	400	65# ou 0,212mm
CP10A e CP10B	**300**	400	65# ou 0,212mm
CP11A e CP11B	**200**	500	65# ou 0,212mm
CP12A e CP12B	**300**	500	65# ou 0,212mm

Fonte: Autor.

A obtenção de cavaco ocorreu junto a Metalúrgica Bez Ltda, de Farroupilha, a qual cedeu cavaco de alumínio da liga AA6060 originado pelo processo de serramento de componentes de esquadrias, realizado sem fluido refrigerante ou lubrificante. O serramento é feito manualmente com serra circular que permite cortes em ângulo e longitudinais, e produz grande quantidade de cavaco, como a maioria dos processos de usinagem.

Para o peneiramento utilizou-se um Agitador de Peneiras com o objetivo de serem confeccionados corpos de prova com diferentes tamanhos de cavaco. A série de peneiras Tyler foi composta pelas peneiras indicadas na Tabela 4. Se o cavaco tiver seção transversal menor que a abertura da peneira, passará para a próxima até ficar retido. Isso significa que se o cavaco for retido na peneira com abertura de 0,85mm, por exemplo, sua seção transversal deve ter um valor entre 0,85mm e 1,7mm. Uma consequência da técnica de peneiramento é a possibilidade de um cavaco ficar posicionado de forma a não passar de determinada peneira, mesmo tendo seção transversal menor que sua abertura, como

se estivesse deitado, o que representa uma limitação da técnica, e que pode alterar a distribuição de tamanho de cavaco dentro da mesma peneira.

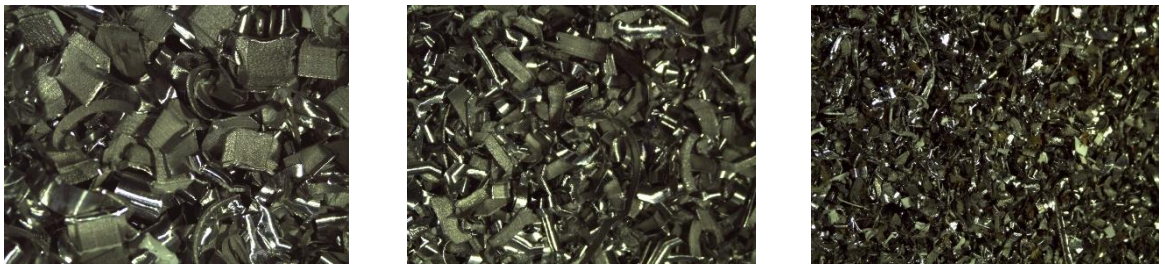
Tabela 4: Peneiras utilizadas no Agitador de Peneiras para separação do cavaco por tamanho

Peneira	Classificação [Tyler, #]	Abertura [mm]
a	10	1,700
b	20	0,850
c	28	0,600
d	35	0,425
e	48	0,300
f	65	0,212

Fonte: Autor.

A partir do peneiramento do material foram selecionados três tamanhos de cavacos, os que ficaram retidos nas peneiras 20#, 35# e 65#. Com essa seleção, tem-se cavacos com tamanhos: (a) entre 0,85mm e 1,7mm; (b) entre 0,425mm e 0,6mm, e (c) cavacos entre 0,212mm e 0,3mm. Estes tamanhos foram definidos buscando encontrar, dentre as peneiras disponíveis, uma relação entre elas, que para cada tamanho selecionado, a abertura diminui pela metade. A partir deste ponto, os tamanhos de cavaco serão citados como 0,85mm para (a), 0,425mm para (b) e 0,212mm para (c), conforme mostrados na Figura 5.

Figura 5: tamanho de cavaco de 0,85 mm (a), 0,425mm (b) e 0,212mm (c), com aumento de 10x



(a) (b) (c)

Fonte: Autor

Pela Figura 5, percebe-se o formato irregular do cavaco gerado pelo processo de serramento. Após a separação por tamanho, o material foi pesado em uma Balança Analítica Shimdzu UW6200H de precisão com 02 (duas) casas decimais, para serem confeccionados os corpos de prova de formato cilíndrico.

A massa dos corpos de prova foi definida a partir da densidade teórica do alumínio - 2,7g/cm^3 - e uma altura arbitrária desejada do corpo de prova, de 3mm. Assim, com uma matriz com 25mm de diâmetro mostrada pela Figura 6, aplicando-se a Equação 1, chegou-se a massa de 4 g.

$$d = \frac{m}{V} \qquad (1)$$

Onde:

d = densidade, em kg/m^3;

m = massa, em g;

V: volume: em m^3.

Na etapa de compactação o cavaco foi compactado em uma Prensa Hidráulica Ribeiro RP0004 com capacidade para 30 toneladas-força de ação simples. A matriz utilizada resulta em corpos de prova com formato cilíndrico. Segundo German (1984), em geral, são utilizadas cargas entre 100MPa e 700MPa para compactação de pós metálicos. Também foram utilizados estudos de Alves (2018) (que utilizou 240 MPa e 480 MPa), Neves (2019) (que utilizou 300 MPa, 400 MPa e 450 MPa) e Lima (2020) (que utilizou 200 MPa e 500 MPa).

Figura 6: matriz de compactação

Fonte: Autor.

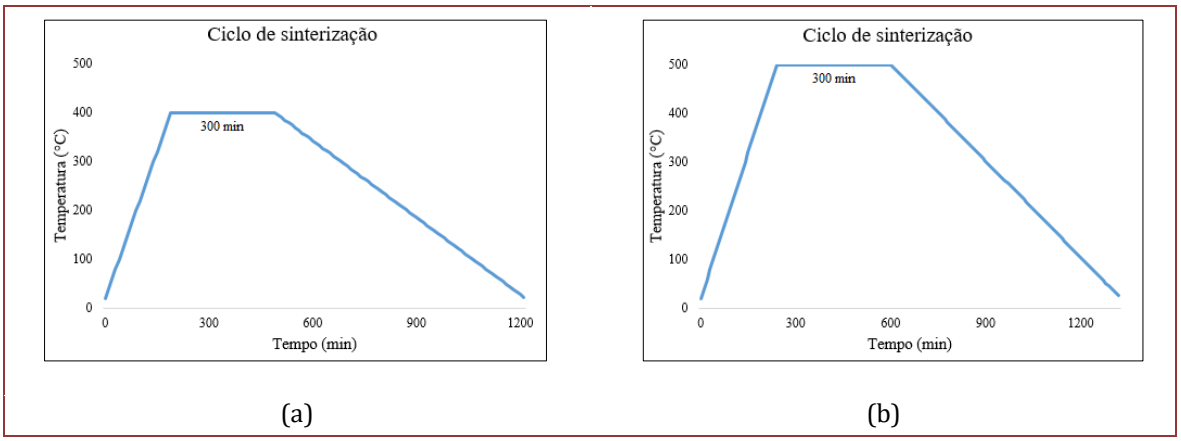
A matriz foi fabricada em aço carbono, e combinada à prensa utilizada, têm-se um sistema de compactação de ação simples. Neste sistema de compactação, a distribuição da pressão empregada na massa do pó não é uniforme, Chiaverini (2001).

Realizada a compactação foi determinada a densidade aparente dos corpos de prova com o método geométrico utilizando a relação massa/volume com balança analítica de precisão com 02 (duas) casas decimais para as medidas de massa, e micrômetro Mitutoyo 0-25mm com graduação de 0,01mm, para a medição dimensional da altura e diâmetro do material. Esta medida foi realizada buscando o centro dos corpos de prova. A partir destes valores obtém-se a densidade aparente por meio da Equação 1 anteriormente apresentada.

Em sequência, na etapa de sinterização, os corpos de prova foram ao forno, sem controle de atmosfera, a uma temperatura de 400°C e 500°C, com taxa de aquecimento de 10 °C/min, permanecendo no forno por 300 minutos. O tempo de permanência foi definido a partir dos estudos de Zarzar (2020) e Silva Junior (2020), e as temperaturas foram selecionadas como German (1984) e Chiaverini (2001) explicam, sendo indicada uma temperatura de sinterização entre 2/3 e 3/4 da temperatura de fusão do material, sendo 660°C para o alumínio.

O forno utilizado tem capacidade para atingir até 1100°C com taxa máxima de aquecimento de 10°C/min e possui sistema de aquecimento por resistência elétrica. Os corpos de prova permaneceram no forno até atingirem temperatura ambiente. A Figura 7 ilustra o ciclo de sinterização dos corpos de prova.

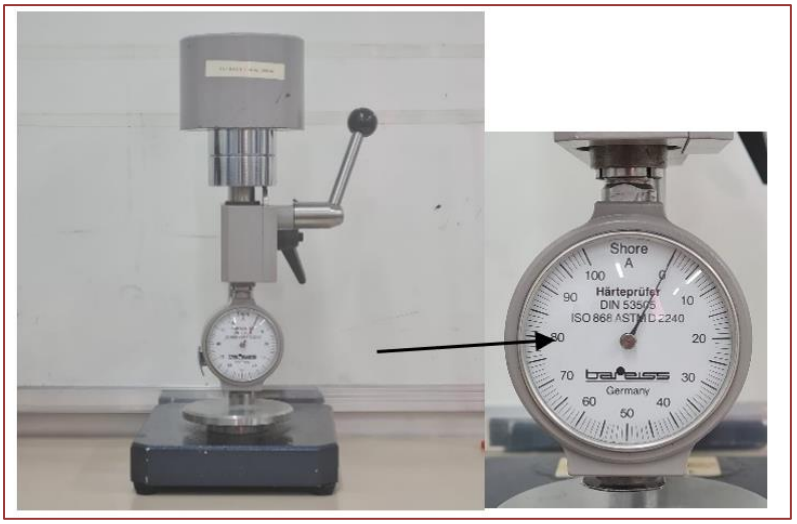
Figura 7: Ciclos de sinterização para os corpos de prova sinterizados a 400°C (a) e a 500°C (b)



(a) (b)

A densidade aparente foi medida novamente após a etapa de sinterização, e sendo sucedida por um ensaio de dureza Shore A, com um Durômetro Analógico Shore A 0-100 Bareiss, mostrado na Figura 8. O durômetro funciona com um indentador ligado a uma mola que, quando pressionados contra uma superfície, indicam a dureza do material pelo indicador no próprio corpo do dispositivo. Um durômetro Shore comumente tem escala de 0 a 100, sendo a medida 0 quando a penetração é máxima, e 100 quando a penetração é mínima. O ensaio Shore A foi escolhido pois para o ensaio Brinell, os corpos de prova ficaram fora de escala, visto que as impressões geradas têm diâmetro maior do que o equipamento pode medir.

Figura 8: Durômetro analógico Shore A 0-100 Bareiss, com detalhe do indicador de dureza no próprio corpo do dispositivo

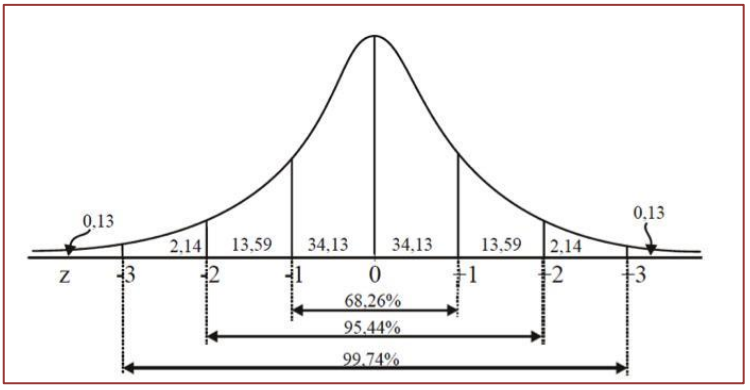


Fonte: Autor.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados serão apresentados por gráficos e comparações entre os parâmetros que foram analisados, que são o tamanho do cavaco, a carga de compactação e a temperatura de sinterização, e as medições de densidade aparente e dureza. Em cada gráfico estão os valores médios das medições de densidade e dureza, e são mostrados os valores de 02 (dois) desvios padrão acima e abaixo da média, sendo um intervalo de confiança de 95,44%, seguindo uma distribuição normal. A Figura 9 ilustra a curva de distribuição normal. A seção 4.2 compara os parâmetros com a densidade aparente, e a seção 4.3 compara os parâmetros com a dureza. Os valores obtidos para todos os corpos de prova são mostrados na Tabela 5.

Figura 9: Curva de distribuição normal



Fonte: Antunes (2017).

Tabela 5: valores de densidade aparente do compactado verde, do compactado sinterizado e suas diferenças

CP	Densidade aparente compactado verde (g/cm³)	Densidade aparente compactado sinterizado (g/cm³)	Diferença de densidade (valor absoluto)	Diferença de densidade (valor percentual)
CP1A	2,12	2,09	-0,02	1,17%
CP1B	2,08	2,08	0,00	0,22%
CP2A	2,25	2,21	-0,04	1,83%
CP2B	2,28	2,26	-0,03	1,11%
CP3A	2,11	2,08	-0,04	1,67%
CP3B	2,10	2,05	-0,05	2,24%
CP4A	2,28	2,25	-0,03	1,31%
CP4B	2,24	2,20	-0,04	1,92%
CP5A	2,17	2,06	-0,11	5,02%
CP5B	2,13	2,10	-0,03	1,43%
CP6A	2,30	2,27	-0,03	1,31%
CP6B	2,27	2,25	-0,02	1,03%
CP7A	2,14	2,07	-0,07	3,26%
CP7B	2,14	2,08	-0,06	2,93%
CP8A	2,30	2,24	-0,06	2,56%
CP8B	2,26	2,24	-0,03	1,11%
CP9A	1,96	1,86	-0,10	5,13%
CP9B	1,95	1,83	-0,13	6,47%
CP10A	2,05	1,94	-0,11	5,16%

Tabela 5: valores de densidade aparente do compactado verde, do compactado sinterizado e suas diferenças (continuação)

CP	Densidade aparente compactado verde (g/cm^3)	Densidade aparente compactado sinterizado (g/cm^3)	Diferença de densidade (valor absoluto)	Diferença de densidade (valor percentual)
CP10B	2,00	1,86	-0,14	6,80%
CP11A	1,94	1,82	-0,12	6,07%
CP11B	1,89	1,72	-0,17	8,81%
CP12A	2,03	1,87	-0,17	8,18%
CP12B	1,87	1,70	-0,18	9,45%

Fonte: Autor.

4.1. ANÁLISE VISUAL

As Figuras 10 e 11 mostram 3 corpos de prova, cada um com formado com um tamanho de cavaco diferente.

Figura 10: corpos de prova após sinterização, confeccionados com diferentes tamanhos de cavaco. (a) 0,212mm, (b) 0,425mm e (c) 0,85mm

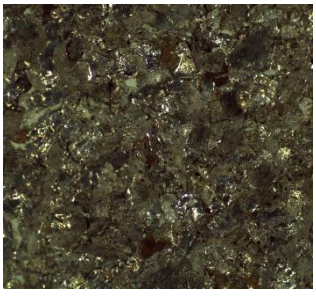
(a)

(b)

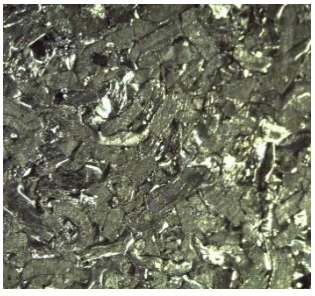
(c)

Fonte: Autor.

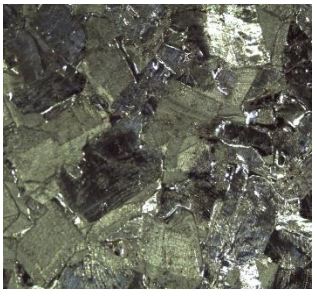
Figura 11: corpos de prova após sinterização, confeccionados com diferentes tamanhos de cavaco, com aumento de 20X. (a) 0,212mm, (b) 0,425mm e (c) 0,85mm.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autor.

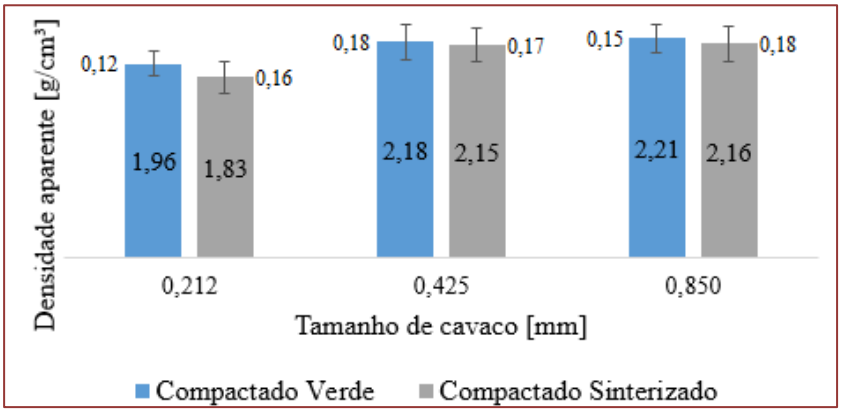
O material compactado, mostrado nas Figuras 10 e 11, apresenta rebarbas em sua extremidade, principalmente para o cavaco de maior tamanho, mesmo a matriz tendo

tolerância mínima. Além disso, o acabamento superficial varia significativamente de acordo com o tamanho do cavaco utilizado. Nota-se também uma melhor acomodação dos cavacos para o corpo de prova de 0,212mm, mas em todos se observa a presença de descontinuidades.

4.2. DENSIDADE APARENTE

A comparação entre as densidades aparentes e o tamanho de cavaco utilizado é ilustrada pela Figura 11. Também é representada a diferença das densidades antes e depois da etapa de sinterização.

Figura 11: relação entre densidade aparente e tamanho de cavaco



Fonte: Autor.

Em relação às densidades aparentes do compactado verde e do compactado sinterizado, nota-se uma diminuição da densidade após a sinterização. A Figura 11 mostra as médias das densidades de cada grupo de tamanho de cavaco.

Os valores de 02 (dois) desvios padrão de cada grupo também são mostrados. Percebe-se que a média do primeiro grupo, antes da sinterização, de 1,96g/cm^3, com 02 (dois) desvios padrão para cima, chega a 2,08g/cm^3. E para o segundo grupo, para as mesmas condições tem-se a média em 2,18g/cm^3, e com 02 (dois) desvios padrão para baixo, chega a 2g/cm^3. Isso revela que os grupos, mesmo tendo parâmetros diferentes, apresentam valores muito próximos.

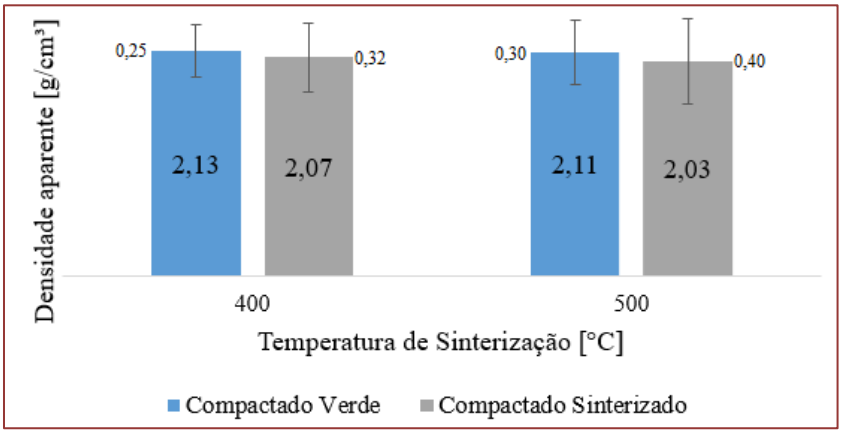
Se observa uma menor densidade nos corpos de prova com tamanho de cavaco menor, o que pode significar uma maior porosidade. Conforme Chiaverini (2001), quanto maior o tamanho e a quantidade de poros, maior é a dificuldade para a sinterização completa do material, visto que há menos contato físico entre as partículas, neste caso, entre os cavacos.

Observa-se também que a densidade aparente para os tamanhos de cavaco de 0,425mm e 0,85mm, ficou muito próxima, o que pode significar que para a densidade, ambos se comportam da mesma forma. O método para determinar a densidade também pode ter interferido nos resultados. Consentino (2006) explica que para determinar o volume de um material com alta presença de poros e descontinuidades, a situação é complexa, uma vez que há mais que uma forma de medir o volume do corpo de prova. Um dos fatores que

contribuem para a porosidade é o formato do cavaco irregular *rodlike* do cavaco obtido. Outro fator que pode influenciar as dimensões finais é o encruamento do material ao ser compactado. Quanto mais elevada a pressão de compactação, maior é o encruamento do material, interferindo na variação dimensional do corpo de prova.

Já a Figura 12 mostra o comportamento da densidade em relação a temperatura de sinterização.

Figura 12: relação entre densidade aparente e temperatura de sinterização



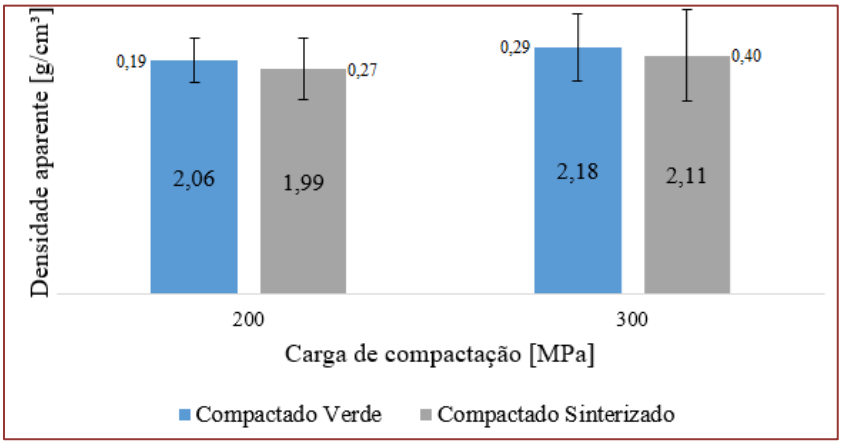
Fonte: Autor.

Observa-se que tanto para a temperatura de 400°C quanto para a de 500 °C, a variação da densidade aparente após a sinterização foi praticamente idêntica, sendo 0,06g/cm^3 para o primeiro grupo, e 0,08g/cm^3 para o terceiro.

Os grupos de corpos de prova sinterizados a 400°C e 500°C apresentaram densidades de 2,07g/cm^3 e 2,03g/cm^3, respectivamente, sendo valores muito próximos, indicando que para os parâmetros utilizados, de tamanho de cavaco e carga de compactação, ambas as temperaturas atingem o mesmo resultado. Ao ser analisada qualquer densidade da Figura 12, percebe-se que o alto desvio padrão da medida contempla todas as demais densidades, reafirmando a proximidade dos valores.

Um parâmetro que teve influência na densidade foi a carga de compactação, conforme cita German (1984). A Figura 13 compara os valores de densidade e as cargas de compactação utilizadas.

Figura 13: relação entre densidade aparente e carga de compactação



Fonte: Autor.

Nota-se que os corpos de prova submetidos a uma maior carga apresentam maior densidade aparente, visto que há uma maior eficiência na eliminação dos poros existentes no material, um dos objetivos principais da etapa (German, 1984). Com menor quantidade de poros, e com poros menores, em geral, os cavacos acomodam-se melhor e ficam mais próximos, o que acarreta em uma densidade maior e mais uniforme ao longo de toda a superfície e interior do corpo de prova. Segundo o mesmo autor, o comportamento da densidade aparente em materiais mais dúcteis é peculiar, podendo apresentar altas variações, e de forma inconsistente porque que podem ter uma deformação plástica elevada.

Além disso, Chiaverni (2001) aborda a distribuição de pressão aplicada na massa do pó, que em prensas de ação simples, não é uniforme. Para uma distribuição uniforme, comumente utiliza-se o método isostático de compactação (pressão uniforme em todas as direções), na qual acarreta em uma densidade uniforme em todo o compactado.

4.3. DUREZA SHORE A

A escala escolhida para comparar as durezas dos corpos de prova foi a Shore A. Ela é comumente utilizada em polímeros, borrachas, elastômeros e metais mais macios. A decisão deu-se após os ensaios de dureza Brinell se mostrarem fora de escala visto que para esta medida, o método de ensaio gera uma impressão na peça, e a dureza é função do diâmetro desta impressão. O diâmetro impresso nas peças foi maior do que o equipamento pode medir, mesmo utilizando uma carga baixa e um indentador de menor diâmetro, inviabilizando a utilização desta escala. A Tabela 6 apresenta os parâmetros para confecção de cada corpo de prova e a dureza medida.

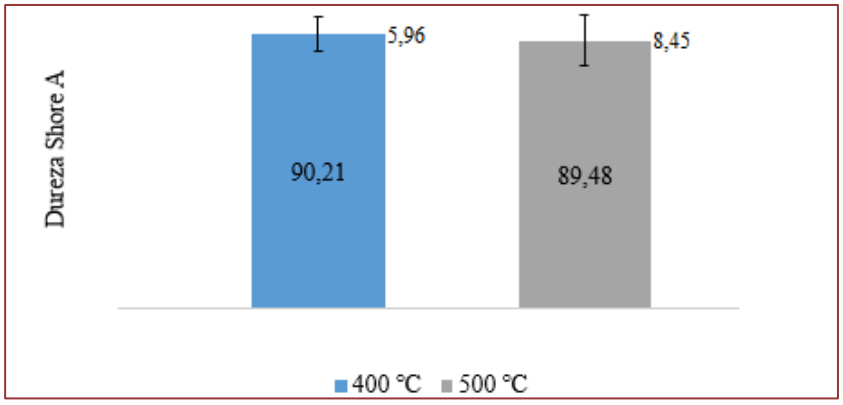
Tabela 6: valores de dureza Shore A do compactado sinterizado e parâmetros utilizados

CP	Dureza [Shore A] Média de 04 leituras	Desvio padrão da dureza	Carga de compactação [MPa]	Temperatura de sinterização [°C]	Tamanho de cavaco [mm]
CP1A	92,00	1,22	200	400	0,425
CP1B	93,25	0,83	200	400	0,425
CP2A	93,25	0,83	300	400	0,425
CP2B	91,50	2,18	300	400	0,425
CP3A	86,25	2,59	200	500	0,425
CP3B	87,00	4,24	200	500	0,425
CP4A	82,25	0,83	300	500	0,425
CP4B	95,75	1,92	300	500	0,425
CP5A	83,50	5,02	200	400	0,85
CP5B	91,50	1,50	200	400	0,85
CP6A	91,25	2,38	300	400	0,85
CP6B	84,50	3,20	300	400	0,85
CP7A	88,50	1,66	200	500	0,85
CP7B	93,50	2,06	200	500	0,85
CP8A	94,75	1,09	300	500	0,85
CP8B	82,25	6,30	300	500	0,85
CP9A	91,25	1,79	200	400	0,212
CP9B	89,50	0,50	200	400	0,212
CP10A	91,25	1,30	300	400	0,212
CP10B	89,75	0,83	300	400	0,212
CP11A	91,25	0,83	200	500	0,212
CP11B	91,50	1,12	200	500	0,212
CP12A	90,00	1,73	300	500	0,212
CP12B	90,75	2,38	300	500	0,212

Fonte: Autor.

A Figura 14 ilustra o comportamento dos corpos de prova submetidos a ambas temperaturas, de 400°C e 500°C.

Figura 14: Relação entre dureza e temperatura de sinterização

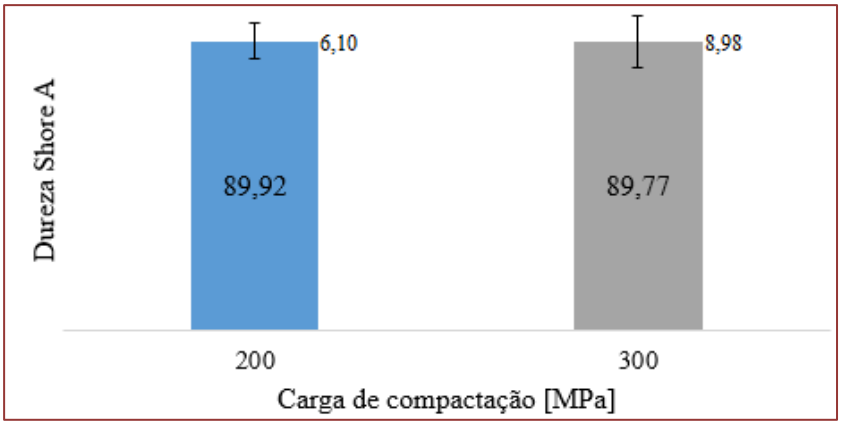


Fonte: Autor.

Observa-se que a dureza média dos dois grupos ficou muito próxima, de 90,21 Shore A para os sinterizados a 400°C, e de 89,48 Shore A para os sinterizados a 500°C. Também nota-se um alto desvio padrão, principalmente para o segundo grupo. Com estes valores, pode-se dizer que para a combinação de parâmetros utilizados, de tamanho de cavaco e de carga de compactação, as temperaturas utilizadas influenciam pouco na dureza do material final. Com a alta presença de poros, os cavacos ficam mais afastados uns dos outros, dificultando a sinterização completa. Uma alternativa seria utilizar uma carga de compactação maior, com objetivo de aproximar os cavacos e diminuir a porosidade.

Por sua vez, a dureza para os corpos de prova compactados com 200MPa e 300MPA ficaram muito próximas, conforme mostrado na Figura 15.

Figura 15: Relação entre dureza e carga de compaCtação

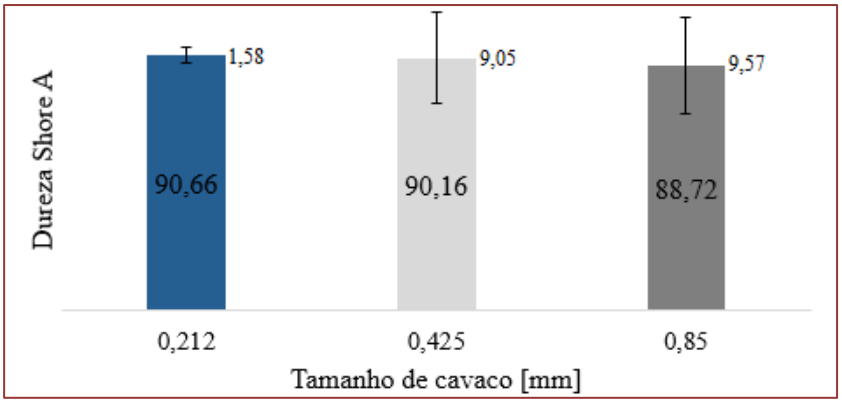


Fonte: Autor.

O desvio padrão das medições de dureza foi elevado para ambos os grupos. Mesmo retirando os valores máximos e mínimos das 04 medições, a dureza média continua apresentando valores próximos entre os corpos de prova compactados com 200MPa e 300MPa. Este comportamento pode ser explicado pela alta porosidade e descontinuidade nos corpos de prova, o que resulta em uma medição não tão precisa de dureza, e assim, altos desvios padrão. A alta porosidade e descontinuidade pode ser consequência dos parâmetros utilizados em todo o processo de metalurgia do pó. Ainda assim, observa-se na Tabela 6 que as maiores durezas foram apresentadas predominantemente pelos compactados com a maior carga.

A Figura 16 mostra o comportamento da dureza de acordo com os diferentes tamanhos de cavaco utilizados.

Figura 16: Relação entre dureza e tamanho de cavaco



Fonte: Autor.

Mesmo os maiores valores de dureza não serem apresentados pelos corpos de prova com o menor tamanho de cavaco, (Tabela 7), as médias se comportam de forma diferente. As amostras confeccionadas com o menor cavaco, de 0,212mm, foram as que tiveram a maior média de dureza, com 90,66 Shore A. Os valores de dureza para os corpos de prova com cavaco de 0,212mm tiveram um desvio padrão muito menor quando comparado às demais dimensões, sendo o valor de 90,66s Shore A, com 02 (dois) desvios padrão para baixo chegando a 89,08 Shore A, valor superior aos 88,72 Shore A dos corpos de prova compostos pelo cavaco de 0,85mm. Para os dois grupos que utilizaram cavacos maiores, 0,425mm e 0,85mm, o desvio padrão mostrou-se notavelmente maior, significando, provavelmente, que o indentador, ao realizar a medição, ora tocou na superfície de um cavaco único, ora tocou em uma união entre dois cavacos, o que não teria ocorrido para o grupo com cavaco de 0,212mm.

5. CONCLUSÃO

Os valores de dureza apresentados pelos corpos de prova são muito próximos quando comparados com os parâmetros de tamanho de cavaco, carga de compactação e temperatura de sinterização. Dentro do desvio padrão, as amostras têm praticamente a mesma dureza. O fato do ensaio Brinell ter impresso um diâmetro muito grande para poder ser medido pode indicar que os corpos de prova têm alta porosidade e que no momento do ensaio o indentador está compactando o material, aproximando ainda mais o cavaco, e não o deformando plasticamente.

Também com valores próximos, a densidade pode ter seu valor impactado diretamente pelo método de medição, que conforme relata Consentino (2006), é complexa para materiais com quantidade elevada de poros. German (1984) diz que a densidade aparente de materiais dúcteis pode ter uma variação alta e se comportar de forma inconsistente, pois podem deformar plasticamente de forma mais acentuada. Os corpos de prova submetidos a uma carga maior de compactação apresentaram, em média, maior densidade. O mesmo não se observa com clareza em relação à dureza, em que foram obtidos valores muito próximos para ambas as cargas.

A maior temperatura de sinterização resultou em uma maior variação da densidade aparente, mas não interferiu de forma significativa na dureza dos corpos de prova. Para

estes tamanhos de cavaco e temperaturas utilizadas, recomenda-se uma maior carga de compactação. E os tamanhos de cavaco utilizados não se mostraram tão influentes na densidade e dureza.

Segundo Carson et *al*. (1998), o processo de metalurgia do pó alcança densidades que podem variar de 80 a 90% da densidade teórica do material. A densidade teórica do alumínio é de 2,7g/cm^3, Carson et *al*. (1998), e os corpos de prova confeccionados atingiram valores de densidade entre 63% e 84% desta referência, estando, em partes, dentro da faixa esperada, devido ao alto desvio padrão encontrado.

A alta variação nos valores de densidade aparente e dureza, bem como a inconsistência de alguns valores e relações encontradas provavelmente significam uma alta presença de poros e descontinuidades, podendo ser originados da variação dimensional (distribuição do tamanho do cavaco), do tamanho do cavaco, da geometria do cavaco e de uma atmosfera não controlada na etapa de sinterização. A utilização de MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura) contribui para uma melhor análise do material, como por exemplo, a eficiência da sinterização, possibilitando assim, compararmos a rota simplificada com o processo padrão de metalurgia do pó.

Com isso, conclui-se que o processo experimental simplificado, para encontrar uma rota alternativa para a utilização de cavaco, foi insuficiente para criar um processo de fabricação que atenda às necessidades mecânicas, e que pode ser avaliado com outros parâmetros. É sugerido para trabalhos futuros que a medição de densidade dos corpos de prova seja realizada com outro método mais preciso e confiável, como o princípio de Arquimedes, que determina as massas da amostra seca, da amostra úmida e da amostra submersa em água destilada. Misturar os 3 tamanhos de cavaco também pode contribuir para um melhor preenchimento dos espaços vazios. Além disso, recomenda-se que a matéria-prima tenha seus cavacos mais finos, podendo ser combinado com pó do mesmo material em diferentes proporções, assim como proposto Sampaio de Souza (2012). Com isso, é possível que o material mais fino possa tomar lugar dos poros presentes no compactado.

Outra sugestão é moer o cavaco com objetivo de diminuir o tamanho do material, como Silva Junior (2020) e Zarzar (2020) realizaram estudos, e assim conseguir uma compactação mais eficiente, que diminua de forma significativa a quantidade e o tamanho dos poros. Desta forma, constata-se que a moagem do cavaco é essencial, ou que se parta de um material particulado mais fino. Também aconselha-se submeter o material a uma maior carga de compactação, contribuindo para a diminuição dos poros, e que o formato do corpo de prova permita outros ensaios mecânicos, como de tração ou de impacto.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a professora Lisiane pela oportunidade de desenvolver este trabalho, pelo acompanhamento e conhecimento compartilhado comigo durante toda sua elaboração. Agradeço aos professores e técnicos do IFRS do campus Farroupilha e a Metalúrgica Bez Ltda pelo fornecimento do material. Agradeço aos amigos que fiz durante o período de graduação e aos meus pais, Zuldenir e Valdiva, que não medem esforços para me apoiar e me orientar em todos os momentos. Agradeço ao meu irmão André, que me motiva e me faz crescer, sendo o melhor presente que tive e terei por toda vida.

REFERÊNCIAS

[1] Abal, Associação Brasileira do Alumínio. Características Químicas e Físicas. Disponível em: <https://abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/>

[2] Adams, J.H. Bounds, Charles. O.; et *al*., 1990, ASM Handbook: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials.

[3] Alves, João Victor Costa, 2018, Metalurgia do pó: Avaliação da viabilidade técnica do processamento de cavacos das ligas de alumínio AA1060 e AA3003. Natal.

[4] Antunes, Rui. 2017, Sondagens e Estudos de Opinião: Estatística Descritiva.

[5] Barbosa, Cássio, 2014, Metais não ferrosos e suas ligas: microestrutura, propriedades e aplicações. Rio de Janeiro.

[6] Callister Jr, William D.; Rethwich, David G., 2016, Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução. 9. ed. Rio de Janeiro.

[7] Cardoso, José Guilherme da Rocha et al., 2011, A indústria do alumínio: estrutura e tendências. BNDES Setorial, v. 33, p.43-88.

[8] Carson, J. W.; Pittenger, B. H.; Jenike & Johanson Inc., 1998, Bulk Properties of Powders. ASM Handbook, v. 7, p. 97–101.

[9] Chiaverini, Vicente, 2001, Metalurgia do Pó: Técnicas e Produtos. 3. ed. São Paulo: ABM.

[10] Consentino, Pedro Augusto de Souza Lopes, 2006, Efeito de Carbetos Metálicos na Sinterização do Carbeto de Boro por Prensagem a Quente. Rio de Janeiro.

[11] Costa, Evair Nunes da., 2014, Peneiramento de Partículas Finas e Ultrafinas com Adição de Dispersantes. Catalão.

[12] Davis, Jr., 2001, Alloying: Understanding the Basics; Ohio: Asm International.

[13] Delforge, Daniel Yvan Martin, 2007, Cavaco de um Aço Inoxidável Austenítico Reciclado por Metalurgia do Pó: Uma Rota Alternativa para o Reaproveitamento de Materiais Metálicos. .

[14] German, R., 1984, Powder Metallugy.Principles and Aplications, New York, MPIF.

[15] Gomes, Uliame Umbelino, 1993, Tecnologia dos Pós: Fundamentos e Aplicações. Natal: Editora Universitária da UFRN.

[16] Iervolino, Fernando, 2009, "A Metalurgia do Pó: alternativa econômica com menor impacto ambiental", 1. Ed. São Paulo: Mettalum Eventos Técnicos.

[17] Jesus, Emerson de Sousa de., 2018, "Influência da Granulometria de Nióbio e Tempo de Moagem na obtenção da liga Al1,2%Nb via Metalurgia do Pó", Brasília.

[18] Kamble, Avinash; Kulkami, Vaibhav, 2017, "A text book of metallurgy: properties and applications of ferrous and non-ferrous alloys", Harshal Publications.

[19] Kaufman, J. Gilbert., 2000, "*Introduction to aluminium alloys and tempers", ASM International.*

[20] Lima, Gustavo Maia de., 2020, "Estudo Comparativo das Ligas AA1100, AA3003 e Zamac n°5 via Metalurgia do Pó e suas Propriedades", Natal.

[21] Loberto, Amauri; Genova, Luis Antonio; Silva, Mario do Carmo Amorim da., 2009, "A Metalurgia do Pó: alternativa econômica com menor impacto ambiental", 1. Ed. São Paulo: Mettalum Eventos Técnicos.

[22] Neikov, Oleg D.; Naboychenko, Stanislaw, S.; Dpwson, Goron; et. Al., 2009, "Handbook of non-ferrous metal powders: technologies and applications", Amsterdam: Ed. Elsevier Ltd.

[23] Rochman, n. T.; Kawamoto, K.; Sueyoshi, S.; Nakamura, Y. & Sishida. T., 2009, "*Effect of milling temperature and additive elements on an Fe-C system alloy prepared by mechanical alloying. Journal of Materials Processing Technology"*, Vol.89-90, p. 367-372.

[24] Silva, A. G. P., 1996, "Study on sintering and grain growth of WC-based hardmetals", Tese (Doutorado) - Faculdade de Química, Universidade Técnica de Viena, Viena.

[25] Silva Júnior, Moisés Euclides da., 2020, "Fabricação das Ligas de Alumínio AA3003 e 3303 a partir

dos Pós Elementares de Alumínio e de Manganês, através de técnicas de Metalurgia do Pó", Recife.

[26] Shackelford, James F., 2008, "Ciência dos materiais", 6. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall.

[27] Smith, William F.; Hashemi, Javad, 2012, "Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais", 5. ed. São Paulo: McGraw Hill – Bookman.

[28] Souza, Sérgio Augusto de., 1982, "Ensaios Mecânicos de Materiais Metálicos. Fundamentos Teóricos e Práticos", 5ed.

[29] Távora, Juarez, 1965, "Aspectos do Ensaio de Microdureza", Belo Horizonte.

[30] Toozandehjani, Meysam; Amin Matori, Khamirul; Ostovan, Ffarhad; Abdul Aziz, Sidek; Mamat, Md Shuhazlly, 2017, "*Effect of Milling Time on the Microstructure, Physical and Mechanical Properties of Al-Al2O3 Nanocomposite Synthesized by Ball Milling and Powder Metallurgy*", MDPI, Basel.

[31] Zarzar, Sandra Torres, 2020, "Fabricação e Caracterização de Ligas de Alumínio AA8011 e AA8079 através das Técnias de Metalurgia do Pó e Extrusão a Quente", Recife.

[32] Zilnyk, Kahl, 2008, "Influência da Moagem de Alta Energia na porosidade de produtos da metalurgia do pó", In: Encontro De Engenharia E Tecnologia Dos Campos Gerais, Ponta Grossa.

Capítulo 6

Síntese e caracterização de aço rápido produzido por metalurgia do pó

Francielle Cristine Pereira Gonçalves
Bruno Caio Chaves Fernandes
Ari Lucas Santos Oliveira
Thaís de Oliveira Almeida
Camilla Pereira Soares
Rennáh Francisco Figueiredo Gonçalves
Gustavo César Pamplona de Sousa
Aline da Silva Oliveira

Resumo: Este estudo tem como objetivo desenvolver um aço rápido isento de cobalto (Co) por meio da técnica de metalurgia do pó, utilizando uma composição convencional modificada. Foram produzidas nove amostras variando-se as condições de compactação (pressão) e sinterização (temperatura). A caracterização microestrutural foi realizada por microscopia óptica, e as propriedades mecânicas foram avaliadas por ensaios de microdureza. As amostras foram formuladas com base nos elementos ferro (Fe), molibdênio (Mo), cromo (Cr), carbono (C) e nióbio (Nb), substituindo o vanádio (V) tradicionalmente presente no aço rápido M10. Os resultados indicaram que o aumento da temperatura de sinterização resultou em baixo coalescimento dos grãos e aumento da porosidade, o que comprometeu a densificação do material e levou a valores de microdureza inferiores em comparação com o mesmo aço produzido por via convencional.

Palavras-chave: Aço rápido, Metalurgia do pó, Sinterização.

1. INTRODUÇÃO

A produção de peças e componentes para máquinas sempre enfrentou desafios relacionados à precisão dimensional e acabamento superficial. Para superar essas dificuldades, desenvolveu-se o processo de usinagem, que permite a obtenção de peças com alta precisão e superfícies uniformes, melhorando significativamente a eficiência dos sistemas mecânicos (Silva, 2010).

Um marco importante na evolução dos materiais para ferramentas de corte ocorreu em 1899, quando Taylor e White introduziram o aço rápido (*High Speed Steel* – HSS). Essa inovação revolucionou a usinagem da época, aumentando as velocidades de corte de 3–5 m/min, típicas do aço carbono, para 30–35 m/min com o uso do HSS, resultando em considerável ganho de produtividade (Moro; Auras, 2007).

A metalurgia do pó é uma técnica consolidada para a fabricação de ferramentas de corte, envolvendo a mistura e compactação de pós metálicos seguida da sinterização. Esse processo ganhou destaque após a Segunda Guerra Mundial, impulsionado pela crescente demanda da indústria automobilística (Chiaverini, 2001). As etapas principais incluem a obtenção dos pós, sua mistura, compactação em matrizes e sinterização sob condições controladas de temperatura, tempo e atmosfera, promovendo a união das partículas e conferindo resistência mecânica ao material (Kalpakjian, 2000).

A aplicação da metalurgia do pó na produção de aços rápidos visa aprimorar as propriedades desses materiais, utilizando elementos como tungstênio, cromo, molibdênio, vanádio e cobalto, que apresentam baixa solubilidade (Araújo Filho, 2006). No entanto, a obtenção de ligas como o carboneto de tungstênio com cobalto enfrenta desafios devido à instabilidade no fornecimento do cobalto, frequentemente extraído de regiões em conflito, o que resulta em alta volatilidade de preços (Araújo Filho, 2006).

Nos últimos anos, pesquisas têm se concentrado na substituição do cobalto por elementos alternativos, como o nióbio, na composição de aços rápidos. Estudos indicam que o nióbio pode proporcionar propriedades mecânicas semelhantes às conferidas pelo cobalto, sendo uma alternativa viável na fabricação de aços rápidos por metalurgia do pó (Peixoto et al., 2019). Além disso, esse processo permite a obtenção de microestruturas finas e homogêneas, com menor segregação de carbonetos, o que pode melhorar a resistência ao desgaste e a dureza do material (Soares, 1993; Morais, 2022).

A motivação deste estudo é desenvolver uma liga de aço rápido por meio da metalurgia do pó, utilizando a composição clássica conforme a norma Nbr 116-1, com substituição do vanádio por nióbio. O objetivo é caracterizar as propriedades microestruturais e mecânicas das amostras obtidas, por meio de análises de microscopia óptica e ensaios de microdureza, contribuindo para o avanço no desenvolvimento de aços rápidos isentos de cobalto.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a fabricação do aço rápido por metalurgia do pó, foram utilizados os elementos químicos ferro (Fe), cromo (Cr), molibdênio (Mo), carbono (C), na forma de grafite, e nióbio (Nb), todos adquiridos em forma de pó. O nióbio foi empregado como substituto do vanádio, tendo em vista suas propriedades físicas semelhantes, como elevada dureza e resistência ao desgaste.

A composição das ligas seguiu as especificações da norma Nbr 116-1, sendo os elementos pesados individualmente em balança de precisão com resolução de 0,0001 g. Após a pesagem, a mistura dos pós foi realizada em um recipiente plástico por um período contínuo de 4 horas, a uma rotação constante de 30 rpm, utilizando-se um torno mecânico da marca Nardini, modelo Nodus 220, adaptado para o movimento rotacional do recipiente.

Ao final da homogeneização, o pó misturado foi novamente fracionado, com auxílio da mesma balança de precisão, em nove amostras de 2 g cada. Em seguida, as amostras foram submetidas à compactação em uma prensa hidráulica manual, aplicando-se uma taxa de compressão de 0,5 tonelada a cada 10 segundos, até atingir a pressão desejada. A compactação foi realizada em uma matriz de aço temperado 4340, previamente usinada. As amostras foram divididas em três grupos, conforme a pressão de compactação aplicada: 382,2 MPa (3 toneladas), 509,6 MPa (4 toneladas) e 637 MPa (5 toneladas), com três amostras em cada grupo.

Após a compactação, os corpos de prova (compactados verdes) foram organizados de modo que uma amostra de cada grupo fosse destinada a um dos três tratamentos térmicos por sinterização, totalizando três grupos de três amostras. A sinterização foi realizada em forno elétrico tipo mufla, com capacidade de aquecimento até 1200 °C, nas temperaturas de 900 °C, 1000 °C e 1100 °C. O tempo de patamar térmico foi de 2 horas, seguido de resfriamento lento à taxa de aproximadamente 73 °C/h, realizado dentro do próprio forno, a fim de evitar choques térmicos e preservar a integridade das microestruturas.

Finalizada a etapa de sinterização, os corpos de prova foram submetidos à caracterização microestrutural por meio de microscopia óptica, precedida por ensaio metalográfico padrão. As propriedades mecânicas foram avaliadas por ensaio de microdureza Vickers, utilizando um microdurômetro da marca Shimadzu, modelo HMV-2, conforme os procedimentos estabelecidos pela norma ASTM E384. Os valores obtidos de microdureza foram organizados, tratados estatisticamente e analisados por meio do software Microsoft Office Excel®, para o cálculo das médias e desvios-padrão.

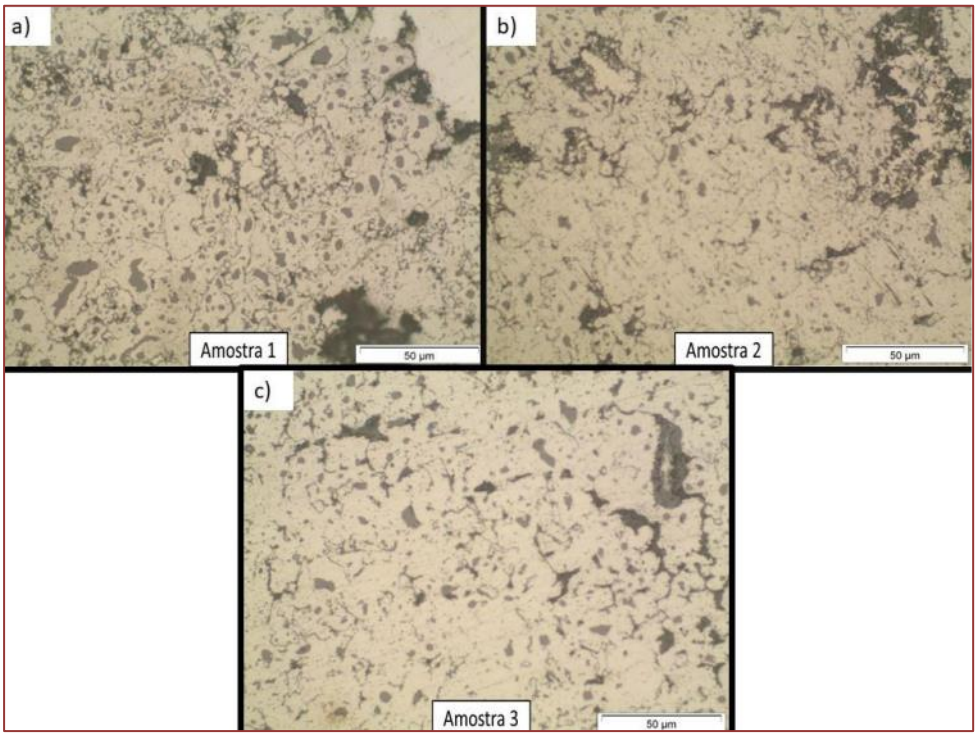
3. RESULTADOS

3.1. MICROSCOPIA ÓPTICA

A análise por microscopia óptica teve como objetivo a obtenção de imagens representativas das microestruturas das amostras sinterizadas. As observações foram realizadas com ampliação de 500x. As imagens obtidas evidenciam a presença de porosidade nas amostras, uma característica intrínseca ao processo de metalurgia do pó. Essa porosidade é influenciada por diversos fatores, entre os quais destacam-se a pressão de compactação e a temperatura de sinterização — variáveis controladas neste estudo.

Nas Figuras 1, 2 e 3, as amostras estão organizadas em grupos de três, conforme os diferentes níveis de pressão de compactação aplicados, apresentados em ordem crescente. Essa disposição permite a comparação direta do efeito da pressão sobre a microestrutura e a quantidade de poros presentes nas amostras.

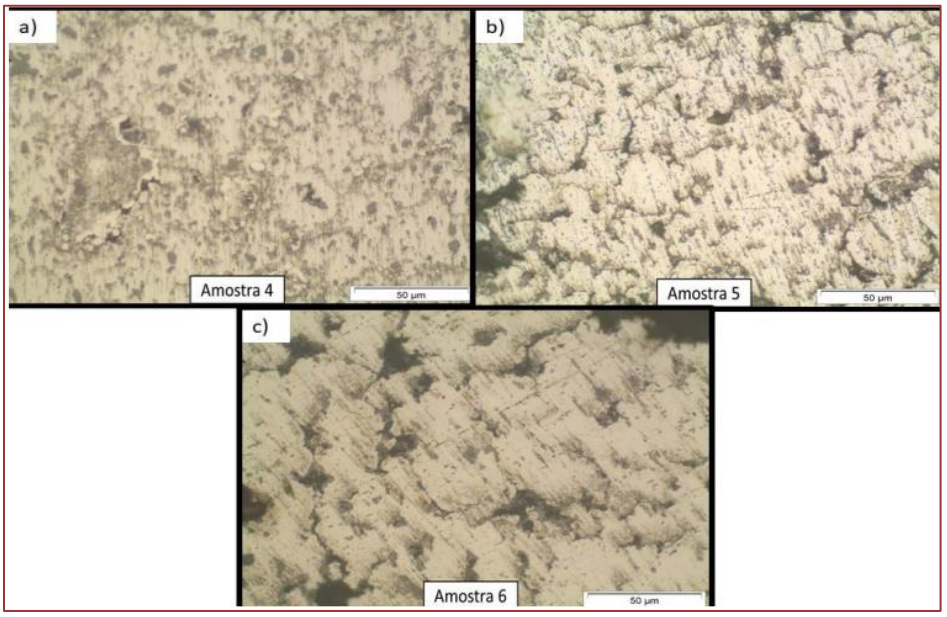
Figura 1 - – Microestrutura das amostras compactadas a 382,2 MPa. a) 900°C; b) 1000°C; c) 1100°C



Com base nas micrografias apresentadas na Figura 1 — correspondentes às amostras compactadas sob pressão de 382,2 MPa e sinterizadas nas temperaturas de 900 °C (amostra 1), 1000 °C (amostra 2) e 1100 °C (amostra 3) — observa-se uma evolução significativa na microestrutura em função da elevação da temperatura de sinterização. Nota-se um bom coalescimento dos grãos metálicos, acompanhado de uma redução progressiva da porosidade e um aumento na uniformidade da distribuição dos grãos.

Esse comportamento é coerente com os princípios da sinterização, segundo os quais o aumento da temperatura favorece os mecanismos de difusão atômica, promovendo a ligação entre as partículas metálicas, o crescimento dos pescoços de sinterização e a densificação do material (Razavi-Taheri et al., 2021; Kang, 2005). À medida que a temperatura se aproxima de um valor ideal para a liga em questão, há uma tendência à redução da porosidade residual e maior homogeneidade microestrutural, fatores determinantes para a melhoria das propriedades mecânicas, como a dureza e a resistência ao desgaste (Kalpakjian; Schmid, 2010).

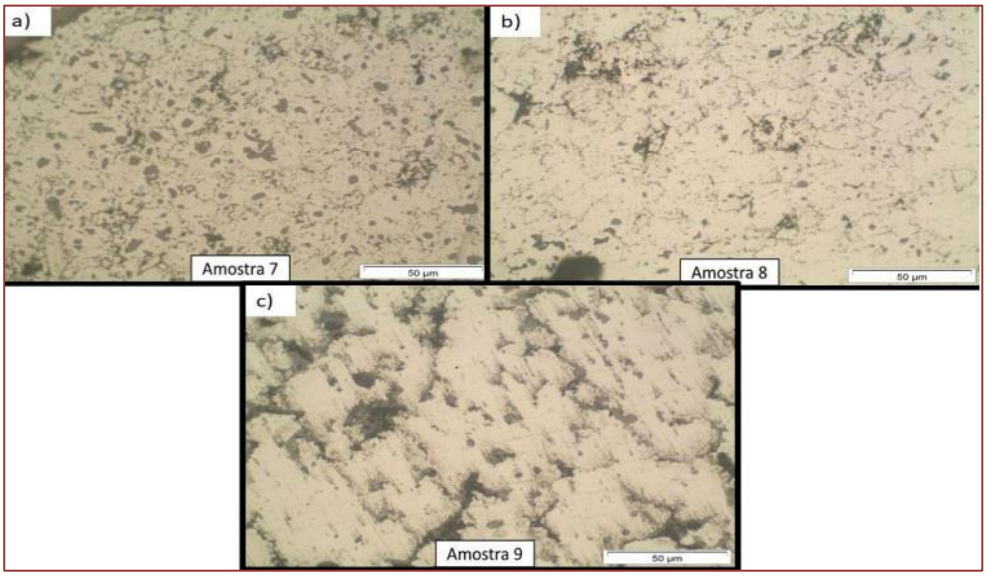
Figura 2 - Microestrutura das amostras compactadas a 509,6 MPa. a) 900°C; b) 1000°C; c) 1100°C



As micrografias mostradas na Figura 2 — referentes às amostras compactadas sob pressão de 509,6 MPa e sinterizadas a 900 °C (amostra 4), 1000 °C (amostra 5) e 1100 °C (amostra 6) — evidenciam uma tendência semelhante à observada para a menor pressão de compactação. Com o aumento da temperatura de sinterização, observa-se uma intensificação do coalescimento entre as partículas, associada à redução da porosidade intergranular e ao aumento da densidade aparente.

A maior pressão aplicada na compactação contribui para uma maior área de contato entre as partículas metálicas, o que favorece os mecanismos de difusão durante a sinterização e resulta em uma microestrutura mais densa e coesa (Kang, 2005). Essa sinergia entre pressão de compactação e temperatura de sinterização é bem documentada na literatura, sendo fundamental para alcançar materiais com melhor desempenho mecânico (Gerd, 2020). Além disso, a uniformidade microestrutural observada nas amostras sinterizadas a 1100 °C indica uma aproximação das condições ideais de sinterização para a liga em estudo.

Figura 3 - Microestrutura das amostras compactadas a 637 MPa. a) 900°C; b) 1000°C; c) 1100°C



Na Figura 3, são apresentadas as micrografias correspondentes às amostras compactadas com pressão de 637 MPa e sinterizadas nas temperaturas de 900 °C (amostra 7), 1000 °C (amostra 8) e 1100 °C (amostra 9). Nesses casos, verifica-se uma densificação ainda mais acentuada, com significativa redução da porosidade visível e excelente coalescimento dos grãos, sobretudo na amostra sinterizada a 1100 °C.

O aumento da pressão de compactação promove maior empacotamento inicial dos pós, diminuindo os espaços vazios entre as partículas e facilitando a formação de ligações metalúrgicas durante a sinterização (Razavi-Taheri et al., 2021). Quando associada a uma temperatura suficientemente elevada, como 1100 °C, essa condição potencializa a difusão superficial e volumétrica, o que resulta em uma microestrutura mais homogênea e com menor fração de poros. Essa evolução microestrutural está diretamente relacionada à melhoria nas propriedades mecânicas do material sinterizado, como resistência à compressão e dureza (Kalpakjian; Schmid, 2010).

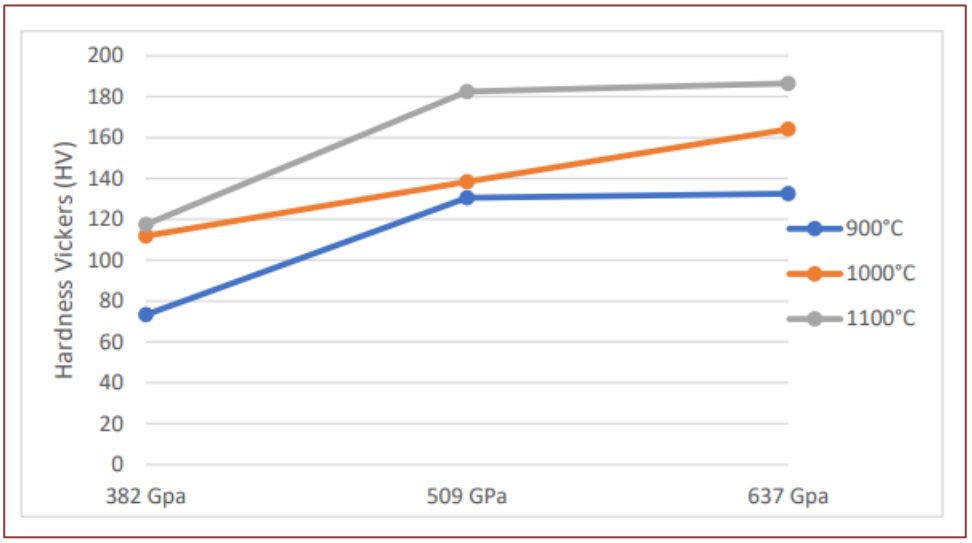
3.2. MICRODUREZA VICKERS

Na Tabela 1, são apresentados os valores médios de microdureza Vickers (HV) obtidos para cada amostra, juntamente com seus respectivos desvios padrão. O Gráfico 1 sintetiza esses dados por meio da relação entre a microdureza (HV) com a pressão de compactação (MPa). A análise conjunta das destas duas, revela uma tendência clara de aumento dos valores de microdureza à medida que se elevam tanto a pressão de compactação quanto a temperatura de sinterização.

Tabela 1- Valores médios de microdureza (HV) e desvio padrão de cada amostra

Amostra	Microdureza (HV)	Desvio Padrão (HV)
Amostra 1	73,31	8,28
Amostra 2	111,87	6,62
Amostra 3	117,50	13,03
Amostra 4	130,60	10,80
Amostra 5	138,40	12,74
Amostra 6	182,50	11,16
Amostra 7	132,55	3,93
Amostra 8	164,10	9,64
Amostra 9	186,50	12,86

Gráfico 1 - Gráfico Microdureza (HV) x Pressão de Compactação (MPa)



Esse comportamento está de acordo com os princípios da sinterização aplicados à metalurgia do pó, nos quais uma maior pressão promove melhor empacotamento das partículas metálicas e uma redução da porosidade, enquanto temperaturas mais elevadas intensificam os mecanismos de difusão, favorecendo a coesão da estrutura e o aumento da densidade final (Razavi-Taheri et al., 2021; Tahir; Shah, 2022).

Entretanto, ao confrontar os valores experimentais obtidos neste estudo com os dados da literatura, observa-se que os níveis de microdureza medidos ainda se encontram abaixo dos valores típicos para o aço rápido AISI M10 produzido por via convencional. Segundo Taylor Special Steels (2018), esse tipo de aço apresenta, à temperatura ambiente, uma microdureza da ordem de 860 HV, enquanto Silva (2010) indica uma faixa esperada entre 740 e 980 HV, após conversão de HRC para HV. Tais valores estão significativamente acima dos registrados neste trabalho.

Essa discrepância é atribuída, principalmente, à temperatura de sinterização utilizada. Conforme observado por Soares (1993), os aços rápidos necessitam de temperaturas elevadas para atingirem completa densificação e precipitação adequada dos carbonetos endurecedores. A faixa ideal de sinterização para esses materiais situa-se entre 1250 °C e 1350 °C. Abaixo desse intervalo, os carbonetos, especialmente os de elementos como Mo,

W e V (ou Nb, no caso desta pesquisa), tendem a não se consolidar adequadamente, comprometendo a dureza do material (Liu et al., 2020).

Dessa forma, os resultados obtidos indicam que, embora as condições adotadas neste estudo (pressões de até 637 MPa e temperaturas de até 1100 °C) contribuam para a melhoria das propriedades mecânicas, são insuficientes para se alcançar o desempenho esperado de um aço rápido pleno. Novas investigações utilizando temperaturas de sinterização mais elevadas são recomendadas para promover o endurecimento completo da matriz e a formação adequada dos carbonetos secundários.

4. CONCLUSÕES

O presente estudo demonstrou a viabilidade de se obter um aço rápido isento de cobalto por meio da técnica de metalurgia do pó, utilizando uma composição baseada na norma NBR 116-1, com substituição do vanádio por nióbio. A análise dos resultados mostrou que tanto a pressão de compactação quanto a temperatura de sinterização exercem influência significativa sobre a microestrutura e, consequentemente, sobre as propriedades mecânicas do material, especialmente a microdureza.

Verificou-se um aumento consistente dos valores de microdureza Vickers (HV) com o incremento das pressões de compactação (de 382,2 MPa a 637 MPa) e das temperaturas de sinterização (900 °C a 1100 °C), atingindo valores máximos de 186,5 HV. Esse comportamento é condizente com a teoria de sinterização, na qual o aumento da densificação e do coalescimento entre partículas leva à redução da porosidade e ao fortalecimento da matriz metálica. Contudo, os valores obtidos ainda se mostraram inferiores aos relatados na literatura para o aço rápido AISI M10 forjado convencionalmente, que podem atingir até 860 HV (Taylor Special Steels, 2018), sugerindo que a temperatura de sinterização adotada no experimento (máximo de 1100 °C) foi insuficiente para a completa consolidação da liga.

De acordo com Soares (1993) e corroborado por estudos mais recentes (Zhang et al., 2021), a sinterização eficaz de aços rápidos deve ocorrer em temperaturas elevadas, entre 1250 °C e 1350 °C, para assegurar a preservação dos carbonetos e garantir os níveis de dureza característicos dessas ligas. Assim, conclui-se que o método utilizado neste trabalho é promissor, mas requer ajustes nos parâmetros de sinterização para alcançar propriedades equivalentes aos aços rápidos produzidos por via convencional.

REFERENCIAS

[1] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. E384 - 17: Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. West Conshohocken, Pensilvânia, Eua, 2017.

[2] ARAUJO FILHO, Oscar Olímpio de. Estudo comparativo de aços rápidos AISI M3:2 produzindo por diferentes processos de fabricação. 2006. 167 f. Tese (Doutorado) - Curso de Tecnologia Nuclear - Materiais, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2006.

[3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 116-1: Aços-rápido - Parte 1: Classificação, designação e composição química. Rio de Janeiro - RJ, 2005.

[4] CHIAVERINI, V. Metalurgia do Pó. 4. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2001. 325 p.

[5] GERD, R. S. *Powder Metallurgy and Sintered Materials*. São Paulo: Ed. Técnica, 2020.

[6] KALPAKJIAN, S., Manufacturing Engineering & Tecnology, 4th ed, Addison Wesley, 2000.

[7] KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. R. *Manufatura: Engenharia e Tecnologia*. 6. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

[8] KANG, S.-J. L. *Sintering: Densification, Grain Growth and Microstructure*. Oxford: Elsevier, 2005.

[9] LIU, C.; ZHANG, X.; WANG, Y. Influence of Sintering Temperature on the Properties and Microstructure of PM High-Speed Steel. *Materials Research Express*, v. 7, n. 11, 2020.

[10] MORO, Noberto; AURAS, André Paegles. Metalurgia do Pó e o Futuro da Industria. Florianópolis: Nobertocefetcs, 2007. 27 slides, color.

[11] RAZAVI-TAHERI, A. et al. Effect of Sintering Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of Powder Metallurgy Steels. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 15, p. 3722–3732, 2021.

[12] SILVA, André Luiz V. da Costa e; MEI, Paulo Roberto. Aços e Ligas Especiais. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2010. 646 p. 41

[13] SOARES, S. R. S. Desenvolvimento de ligas de Aço Rápido pelo processo de Metalurgia do pó. 1993. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1993.

[14] TAHIR, M.; SHAH, M. A. Microstructural and Mechanical Behavior of PM Tool Steels: A Review. *Materials Today: Proceedings*, v. 65, p. 2083–2089, 2022.

[15] TAYLOR SPECIAL STEELS. *AISI M10 High Speed Steel Data Sheet*. Sheffield, UK: Taylor Steel Company, 2018.

Capítulo 7

Revestimento de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) como sistema de proteção contra corrosão em oleodutos no RN

Thiago Ticiano Aires de Araújo
Andréa Francisca Fernandes Barbosa
Antônio Robson Gurgel
Keila Regina Santana
Jardel Dantas da Cunha

Resumo: A estrutura brasileira de abastecimento de petróleo, gás e derivados, interligada as fontes de produção, refinarias e centros de consumo, baseiam-se principalmente na malha dutoviária do país. Grande parte dessa malha é, até o momento, operada pela Petrobras ou Transpetro, na qual uma parcela altamente significativa (em torno de 77%) de sua extensão é constituída por dutos com mais de 20 anos de operação. Estudos realizados têm mostrado que os dutos de transporte em atividade no país apresentam sérios problemas de corrosão interna e/ou externa, e formação de depósitos, tanto orgânicos como inorgânicos. Em consequência do processo corrosivo, há a redução da espessura das paredes dos dutos, possível aparecimento de ataque localizado em regiões de condensação e retenção de água e a formação de grande quantidade de resíduo sólido, devido à larga área superficial dos dutos que entram em contato com o fluxo. A extensão e gravidade destes problemas estão relacionadas ao tipo de produto transportado, condições de operação e localização, implicando em manutenção periódica dos mesmos. A suspensão dos serviços de manutenção ocasiona inúmeros prejuízos, entre eles pode ser citada a interrupção dos serviços de transmissão e os problemas ambientais que ocorrem devido aos vazamentos nos dutos. No Brasil, vem sendo utilizado um sistema de revestimento interno para tubulações de condução de petróleo, gás, água, etc., fabricado em tubos de polietileno de alta densidade (PEAD) para protegê-las contra a corrosão e à abrasão, chamado de *Liner*. O presente trabalho tem como objetivo apresentar as principais características dos revestimentos de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) e a sua relação de custo quando comparada com a construção de um novo duto e transporte via carretas-tanques (1, 2, 3 e 4 anos). Foi observado que após 2 anos transportando a produção através de carretas, a despesa com esse inconveniente é equivalente ao custo de reabilitação do duto com a inserção do *liner* expandido de PEAD, tanto para o oleoduto AB como para o oleoduto CD e após 3 (três) anos, os custos com transporte de carreta ultrapassam o investimento para inserção do *liner*, enquanto que, ao quarto ano os valores envolvidos é praticamente equivalente ao custo de fabricação de um novo duto em aço com as mesmas características do anterior.

Palavras-chave: Corrosão, revestimento, PEAD, dutos.

1. INTRODUÇÃO

O maior problema presente no emprego de tubulações, principalmente aquelas feitas de aço, é a corrosão. A corrosão de tubos pode tanto ser externa devido a fatores associado à composição do solo, agentes presentes na atmosfera, ruptura dos revestimentos entre outros. A corrosão interna nas paredes dos dutos de transporte de óleo, gás natural e seus derivados estão sempre associados à presença de água livre em contato com essa superfície e a presença de gases dissolvidos (H2S, O2 e CO2), pela composição do óleo (quanto ao seu *BSW*[1]) e, ainda, por parâmetros operacionais como a velocidade de fluxo, regime de escoamento, pressão e temperatura. Em consequência do processo corrosivo, há a redução da espessura das paredes dos dutos, ocasionando uma redução na pressão de operação, riscos de vazamentos e redução no volume escoado.

A corrosão pode ter consequências diretas e indiretas, sendo algumas delas de natureza econômica, tais como: substituição de equipamento corroído; paralisação do equipamento por falhas ocasionadas pela corrosão; emprego de manutenção preventiva (pintura, adição de inibidores de corrosão, revestimentos, etc.); contaminação ou perda de produtos; perda de eficiência do equipamento (como ocorre em caldeiras, trocadores de calor, bombas, etc.); e superdimensionamento de projetos. (Gentil, 2007).

Estudos ao redor do mundo confirmam que a corrosão é realmente um dos maiores problemas da indústria, sugerindo ainda que os países direcionem cerca de 1% a 3% de seu PIB na busca de alternativas para contenção e reposição de materiais danificados por esta reação química. Estima-se que no Brasil os gastos com produtos e tratamentos de combate à corrosão cheguem a US$ 10 bilhões/ano e boa parte deles na indústria petrolífera. Além do fator meio ambiente, essa preocupação se torna maior pelos amargos prejuízos financeiros decorrentes deste processo químico. (Gama, 2019).

A corrosão provoca perda de espessura e falhas em estruturas metálicas, que podem comprometer sua integridade, levando-as ao colapso e causando grandes acidentes, além de danos ambientais como no caso de vazamentos em dutos. Da inspeção preventiva aos revestimentos, o mercado apresenta novas soluções anticorrosivas e aposta no crescimento da demanda deste setor. (Gama, 2019).

Existem alguns métodos práticos, adotados para diminuir a taxa de corrosão dos materiais metálicos. Os mais comumentes usados são: emprego de inibidores de corrosão; modificações de processo, de propriedades de metais e de projetos; proteção catódica e proteção anódica; emprego de revestimentos protetores metálicos e não- metálicos. Daí ser necessário um balanço econômico para se poder julgar da vantagem das medidas de proteção recomendadas para um determinado equipamento. (Gentil, 2007).

No caso de dutos, a utilização de revestimentos internos, além de proteger contra a corrosão, reduz consideravelmente a rugosidade da superfície interna, com efeitos benéficos de redução de atrito e da formação de depósitos, garantindo a qualidade do produto transportado, a integridade dos dutos, aumento de sua vida útil e a diminuição dos custos envolvidos.

Um sistema de revestimento bastante utilizado é o *Liner,* composto de tubos de polietileno de alta densidade (PEAD), que protege as paredes dos dutos contra a corrosão e à abrasão. O revestimento interior é criado pela tubulação de PEAD, formando um encamisamento interno com uma estrutura composta de dois materiais: tubo de aço carbono - elemento

[1] Sigla de Basic Sediments and Water. Porcentagem de água e sedimentos em relação ao volume total do fluido produzido. (Thomas, 2002).

que suporta a pressão; e o tubo PEAD - elemento que protege o aço da corrosão e da abrasão, formando uma barreira entre o tubo condutor e o fluído transportado. O *Liner* pode ser instalado em linhas de condução que podem ser tubulações novas a serem instaladas, tubulações fora de serviço ou tubulações em operação. Portanto, a sua principal vantagem é a reabilitação *"in situ"* dos dutos em operação ou fora de serviço. Esta tecnologia pode ser aplicada em diferentes sistemas de tubulações como: injeção de água, gás úmido, petróleo cru, injeção e descarte de água salgada, substâncias cáusticas e ácidas, água potável, linhas coletoras de gás, aplicação com CO_2, dentre outros.

O presente artigo abordará a aplicação do polietileno de alta densidade (PEAD) como revestimento de dutos para o escoamento de petróleo e a comprovação da viabilidade técnica e econômica quando comparada a construção de um novo duto e ao transporte da produção com uso de carretas-tanques.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. REVESTIMENTO INTERNO PARA DUTOS DO SETOR PETROLÍFERO

Os dutos utilizados no campo petrolífero sofrem um grande processo corrosivo na sua parte interna, que está em contato com o produto transportado. O petróleo quando extraído dos reservatórios apresenta: sais dissolvidos, como cloretos e sulfatos, e gases dissolvidos, como compostos nitrogenados, compostos oxigenados e compostos sulfurados. Além desses, existem sólidos suspensos que provocam erosão nas paredes internas dos dutos, acelerando o processo de corrosão. (Thomas, 2002).

As empresas do segmento de petróleo e gás têm procurado por produtos e tratamentos que aliem a proteção anticorrosiva e preservação ambiental. Os revestimentos internos vêm sendo cada vez mais especificados em projetos e utilizados de forma crescente, principalmente nos segmentos de Óleo e Gás, onde a agressividade dos fluidos transportados e a manutenção da integridade dos ativos tem consolidado o uso de produtos de alta performance para a proteção anticorrosiva em substratos metálicos de dutos e gasodutos. (Gama, 2019).

Para Gentil (2007), os revestimentos aplicados no interior de tubos de aço podem ter as seguintes finalidades: Anticorrosivos, ou para evitar a contaminação do fluido contido; Anti-abrasivos e anti-erosivos; ou Refratários (isolamento térmico interno). Qualquer desses revestimentos pode ser empregado por uma ou mais das seguintes razões: custo, resistência mecânica, possibilidade de fabricação, necessidade de resistência química e/ou diminuir a perda de carga da tubulação.

É grande a variedade de materiais de revestimento disponíveis no mercado e a grande maioria é empregada após a fabricação do tubo, com exceção do zinco (galvanização) que é aplicado no decorrer da fabricação do tubo. Os materiais mais usados para revestimento interno de tubos se dividem nas seguintes classes: metálicos (zinco), poliméricos (polietileno, polipropileno, esmaltes asfálticos, ebonite, etc.), elastômeros (borrachas) e cerâmicos (vidro, concreto e porcelana), (Gentil, 2007).

Os principais tipos de revestimentos empregados para tubulações enterradas ou submersas, e aplicáveis em fábrica ou em campo, são: Esmalte de Alcatrão de Hulha (Coal-Tar Enamel), Epóxi em Pó por Termofusão (Fusion Bonded Epoxy - FBE), PEBD (Polietileno de baixa densidade), PEAD (Polietileno de alta densidade), Pintura Industrial, Revestimento com Fitas Anticorrosiva, Petrolato e Mantas Termocontráteis.

2.2. ESPECIFICAÇÕES BÁSICAS DE TUBOS DE POLIETILENO (PE)

De acordo com o (Callister, 2007), existe uma infinidade de polietilenos no mercado onde as principais características são associadas: estrutura cristalina, grau de ramificação e densidade. A família dos polietilenos é composta por: Polietileno de Baixa Densidade (PEBD) e o Polietileno de Alta Densidade (PEAD). A Tabela 1 compara as principais características do PEBD e o PEAD.

O PEBD é utilizado para tubos de pequenos diâmetros (3/8" a 1.1/2") e de baixa pressão (4 kgf/cm^2), com a finalidade de irrigação na qual se necessita muita flexibilidade, mas baixa resistência à pressão e a esforços mecânicos. Já o PEAD é utilizado para a maioria dos tubos de pressão (2" a 48"), é mais rígido e tem maior resistência à pressão.

Tabela 1 – Propriedade Físicas de alguns Polietilenos

CARACTERÍSTICAS	PEBD	PEAD
Densidade (g/cm^3)	0,917 a 0,932	0,952 a 0,965
Grau de Cristalinidade (%)	40 a 50	60 a 80
Temperatura de Fusão (ºC)	105 a 110	130 a 135
Temperatura Máxima Permissível (ºC)	80	100
Coeficiente de Expansão Linear (K^{-1})	1,7 x 10^{-4}	2,0 x 10^{-4}
Esforço de Ruptura (MPa)	8,0 a 10,0	20,0 a 30,0
Alongamento da fratura (%)	100 a 650	10 a 1200
Módulo Elástico E (MPa)	200	1000
Estabilidade Química	Boa	Excelente

Fonte: Callister, 2007

Os materiais utilizados para tubos são classificados conforme seu desempenho à pressão para uma vida útil de 50 anos na temperatura de 20ºC. Esse desempenho é analisado em testes de pressão a temperaturas elevadas (80ºC) para simular uma vida útil de 50 anos e têm por finalidade determinar a resistência do material (tensão hidrostática) à pressão no fim de sua vida útil. (Grupo Brastubo, 2001).

A partir dos ensaios de pressão de longa duração é definida a curva de regressão do polietileno. O valor da Tensão Hidrostática Mínima (MHS - *Minimum Hydrostatic Strenght*) do material para uma vida útil de 50 anos a 20ºC é o número utilizado para classificar o material e que também é utilizado para determinar a espessura do tubo. Logo, quanto maior a tensão hidrostática de longa duração, menor a espessura do tubo. A determinação das curvas de regressão dos tubos de polietileno é baseada nas normas DIN 8075 e ISO 4437.

2.2.1. IDENTIFICAÇÃO DOS TUBOS DE POLIETILENO

Todos os tubos de polietileno devem ter uma marcação de metro em metro, executado por processo a quente (*hot-stamping*), e que tenha as seguintes informações mínimas: Nome/Marca do Fabricante, nº da Norma, Classificação do material, Diâmetro Externo (DE), Espessura (mm), PN (Classe de Pressão) ou SDR (relação diâmetro externo/espessura) ou ambos e o lote de fabricação.

A Classe de Pressão (PN) do tubo refere-se à pressão máxima que o tubo pode suportar a 25ºC. A Tabela 2 expressa alguns exemplos de Classes de Pressão (PN) e sua respectiva pressão nominal:

Tabela 2 – Classe de Pressão (PN) dos Tubos de Polietileno

	Pressão Nominal dos Tubos de Polietileno							
Classe de Pressão (PN)	**PN 8**	**PN 10**	**PN 20**	**PN 30**	**PN 50**	**PN 63**	**PN 80**	**PN 100**
Bar ou Kgf/cm²	8	10	20	30	50	63	80	100
Megapascal (Mpa)	0,8	1,0	2,0	3,0	5,0	6,3	8,0	10,0

Fonte: Arquivo Pessoal.

Conforme o comportamento do material, tais tubos são ainda designados por Tipo A ou B, ou seja, um PE 80, por exemplo, pode ser PE 80A ou PE 80B, pois se refere à resistência a pressão do tubo em função da temperatura, ou seja, cada tipo possui um fator de redução de pressão de acordo com a temperatura quando a mesma passar de 25°C.

Quando o tubo transportar fluidos que estejam a temperaturas superiores a 25°C, o projetista da obra deverá dizer qual a Máxima Pressão de Serviço (MPS) que este suportará, pois quanto maior a temperatura, menor a pressão que o tubo suporta. (Grupo Brastubo, 2001).

2.3. CONSIDERAÇÕES DE PROJETO

Em projetos e instalações que utilizam o PE, como no Sistema *Liner*, é importante considerar as características de expansão e de contração térmica, assim como o cálculo hidráulico para definir as perdas de carga do sistema.

2.3.1. EXPANSÃO E CONTRAÇÕES TÉRMICAS EM TUBULAÇÕES DE PE

O coeficiente de expansão e contração térmica para o polietileno é aproximadamente 10 vezes maior que o aço ou o concreto. No entanto, as propriedades viscoelásticas o tornam bastante adaptável para ajuste com o tempo aos esforços impostos pelas alterações térmicas.

A força causada por variações térmicas resulta da tensão na parede da tubulação e na área transversal da parede. O comprimento da tubulação necessária para ancorar toda a instalação contra esta força calculada depende do diâmetro da tubulação, da pressão média de contato entre o PE e a tubulação de aço, e o coeficiente de atrito entre o PE e o material da tubulação. Uma vez instalada a tubulação e com carga de trabalho, a variação de temperatura geralmente é pequena, ocorrendo durante um período de tempo prolongado e não causando tensão significativa na tubulação. (Grupo Brastubo, 2001).

2.3.2. CÁLCULO HIDRÁULICO

Para o dimensionamento hidráulico de tubulações de PEAD podem ser seguidos os mesmos conceitos de projeto de tubulações de materiais tradicionais, sendo os valores de rugosidade do PEAD como o único fator divergente a ser considerado nos cálculos que, quando comparados com os valores de rugosidade de outros materiais é muito pequeno.

Portanto, este fator é uma vantagem excepcional para o projeto, devido resultar em diâmetros menores para uma mesma faixa de vazão. As tubulações de PEAD possuem uma superfície extremamente lisa que se traduz numa excelente capacidade de vazão. Apresentam alta resistência à corrosão, incrustações e proliferação de bactérias. Por suas interessantes propriedades, pode-se utilizar um diâmetro menor para transportar um determinado volume em comparação às tubulações de aço, ferro ou concreto. Além disso, o cálculo hidráulico mantém estas características de fluxo durante toda sua vida útil. (Grupo Brastubo, 2001).

Os conceitos utilizados comumente por engenheiros e projetistas são baseados nas fórmulas de Hazen- Willians e de Colebrook, que divergem apenas na adoção dos fatores de rugosidade, que de forma prática, quando aplicadas para diâmetros e velocidades médias não apresentam diferenças significativas para o projeto, sendo, porém, considerada como mais exata para aplicações específicas a equação de Colebrook. No entanto, é aconselhável que sejam realizados os dois cálculos e considerado no projeto a perda de carga maior. (Giles, 1978).

2.4. MÉTODOS DE UNIÃO E CONEXÕES PARA TUBOS DE POLIETILENO

Os tubos de Polietileno podem ser unidos através dos métodos de soldagem ou através de juntas mecânicas. Dentre os métodos de soldagem tem-se: Termofusão (Topo, Soquete e Sela) e Eletrofusão (Luva e Sela). Dentre os métodos de união por junta mecânica, destacam-se: juntas mecânicas (conexões de compressão, colares de tomada e colarinho/flange) e Juntas de transição PE x Aço. Cada um destes sistemas oferece um conjunto de peças ou conexões para curvas, derivações, tês, reduções, etc. (Brastubo, 2001).

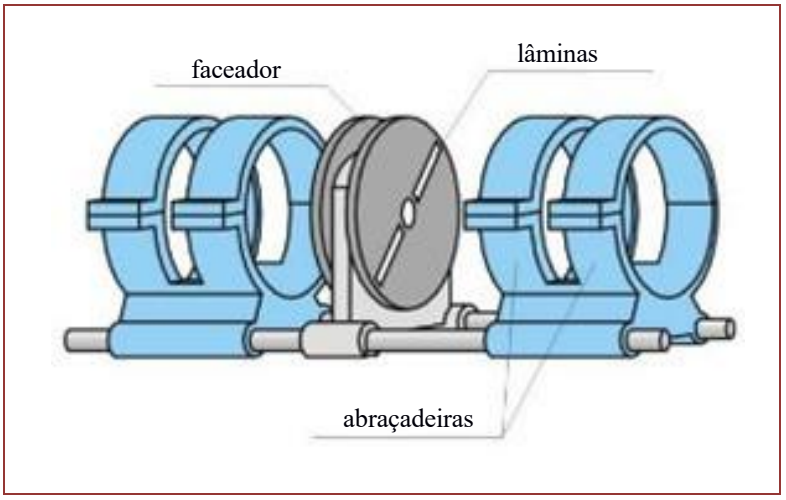
O método de união utilizado para o Sistema *Liner* descrito neste artigo é o de Soldagem de Topo por Termofusão, que é muito aplicado nos tubos de polietileno em geral, e para faixas de diâmetro externo que varia de 50 a 1.200mm (ou 2 a 47 polegadas).

2.4.1. SOLDAGEM DE TOPO POR TERMOFUSÃO

A Soldagem de Topo por Termofusão[2] é a forma mais antiga e tradicional de unir tubos poliolefínicos. Não necessita de peças de união, pois os tubos e/ou conexões são soldados topo a topo através de um equipamento chamado máquina de termofusão (Figura 1), seguindo um procedimento operacional, que funde as extremidades e as comprime uma contra a outra (Figura 2), provendo a interação das superfícies fundidas e sua soldagem.

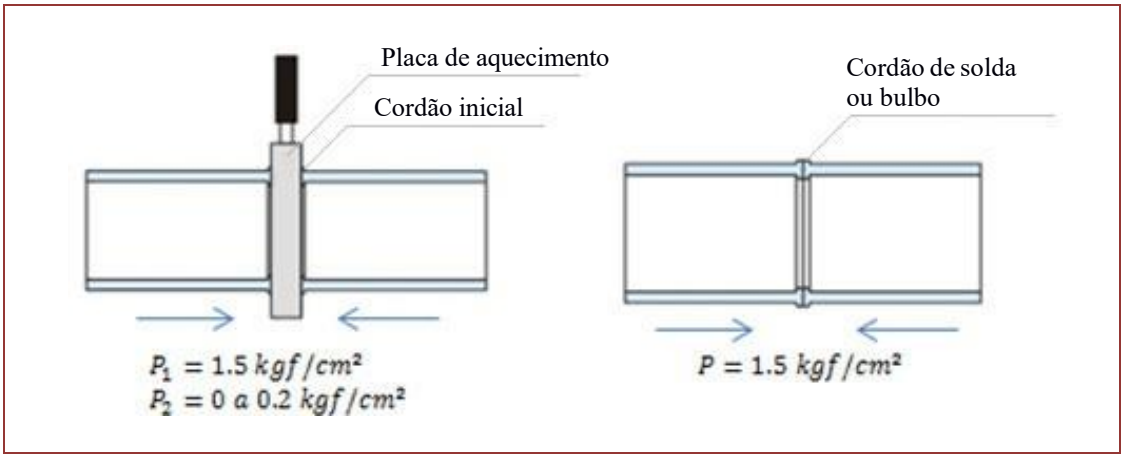
[2] Processo de soldagem de dois elementos de material polimérico através da aplicação controlada de temperatura e força para promover a união.

Figura 1 – Máquina de Termofusão



Fonte: ABPE Módulo 4, 2013.

Figura 2 – Execução de solda de topo pela técnica de termofusão



Fonte: ABPE Módulo 4, 2013).

Os tubos e/ou conexões devem ter as mesmas dimensões nas extremidades de solda, ou seja, mesmo diâmetro e mesmo SDR onde as faces devem ficar paralelas e perpendiculares à geratriz dos tubos, limpas e livres de óleo, graxa e outras sujeiras.

2.5. *LINER* - TIPOS DE SISTEMAS

Como foi dito anteriormente, o Sistema *Liner* consiste de um revestimento interno *"in situ"* para dutos (Oleodutos, Gasodutos, Aquedutos, Minerodutos e Polidutos), através da inserção de tubos plásticos (Polietileno de Alta Densidade - PEAD), que forma uma barreira entre o tubo condutor e o fluído transportado.

Os tubos de polietileno são inseridos e fixados a superfície interna do tubo de aço utilizando algumas tecnologias como: *Tite Liner*®, *Swage Lining* e *Liner* Expandido.

2.5.1. TITE *LINER*®

O *Tite Liner*® é um método de proteção interna contra a corrosão e a abrasão para tubulações novas ou antigas. São utilizados com maior frequência em Minerodutos, além de Oleodutos, Gasodutos e Aquedutos, sendo instalado com êxito em tubulações de 2 a 48 polegadas de diâmetro nominal.

O sistema consiste na inserção de um tubo de PEAD com diâmetro externo maior do que o diâmetro interno do tubo a ser protegido. Isso é conseguido através da redução temporária de diâmetro do tubo de PEAD quando da sua passagem sob tensão por uma sequência de roletes, chamada de caixa de redução. Uma vez que o tubo é inserido, a tensão do cabo é liberada e o tubo de PEAD retorna ao seu diâmetro original, formando um revestimento justo com o tubo receptor (duto de aço). Por este motivo, as principais desvantagens deste sistema são: a elevada tensão permanente durante a inserção, e dificuldade na extração em caso de anomalia (tanto no aço como no *liner*). (Grupo Brastubo, 2001).

2.5.2. SWAGE LINING

Assim como o *Tite Liner*®, o sistema *Swage Lining* consiste na inserção de um tubo de PEAD onde o seu diâmetro externo é maior que o diâmetro interno do duto de aço, o qual necessita também da redução de diâmetro do PEAD no momento da inserção, passando pela caixa de redução. Este sistema é muito utilizado em Aquedutos, mas também pode ser utilizado em Oleodutos, Gasodutos e Minerodutos.

As ligações dos trechos de PEAD para esse sistema são com niples de aço inoxidável soldados ao duto sem a necessidade da utilização de *vent´s*[3]. Por esse motivo, no sistema *Swage Lining,* o duto não necessita de tramos[4] com flanges soldados nas extremidades, como os demais sistemas, e tem como principal desvantagem o custo com a utilização dos niples de aço inoxidável. (Grupo Brastubo, 2001).

2.5.3. *LINER* EXPANDIDO

O *Liner* Expandido, foco deste artigo, consiste na inserção de uma tubulação plástica (PEAD) dentro de um duto de aço existente, cujo diâmetro externo é menor cerca de 6% do diâmetro interno do tubo de aço, criando um sistema combinado, no qual o PEAD resistirá à corrosão e a abrasão, e a tubulação, a resistência mecânica necessária para resistir à pressão de operação. (Grupo Brastubo, 2001).

Esse sistema pode ser instalado em dutos novos e dutos em operação com o intuito de prevenir a corrosão, como também em dutos que estejam desativados com o propósito de reabilitá-lo.

O tubo de PEAD é inserido com certa folga para que submetido à expansão, esse fique em total contato com a face interna do duto de aço, uma vez que todo o ar ou gases existente no espaço anular deverá ser expulso. Tal procedimento é conseguido através dos *vent´s* existentes nas extremidades dos tramos da tubulação. Tais tramos são conectados através de flanges com ranhuras, soldados na tubulação de aço, e por *Stub End* (Figura 7)

[3] Derivação (em pequeno diâmetro) no duto para permitir a purga de ar ou gases que porventura venha acumular-se entre o anular da parede interna do duto e a parede externa do *Liner.*

[4] Corte executado na tubulação para formar seções ou segmentos, dividindo o duto em trechos com flanges nas extremidades, o qual estes trechos são conectados entre si através de união por parafusos e porcas.

termofundidos nas extremidades da tubulação de PEAD. Isso permite que o novo sistema suporte pressões iguais aquelas que a tubulação de aço consegue suportar. (Grupo Brastubo, 2001).

Esse sistema é utilizado com maior frequência em Oleodutos e Gasodutos e, com menor frequência, em Aquedutos e Minerodutos. A referida tecnologia não é aplicável a algumas tubulações termoplásticas, também conhecidas como "*standalone*" ou autônoma, que por sua vez instaladas suportam por si mesmas a pressão de serviço sem necessitar de uma tubulação de aço exterior.

2.5.3.1. VANTAGENS E DESVANTAGENS DO *LINER* EXPANDIDO

De acordo com o Manual Técnico do Polietileno (Grupo Brastubo, 2001), o *Liner* Expandido tem como principais vantagens: Utilização de *Stub End*; Uso de flanges nas extremidades dos tramos; Requer pouco espaço nas extremidades dos tramos para inserção; Menor quantidade de tramos; Aplicável em curvas com raio menor que 30xDE; Baixa tensão permanente na inserção; Possibilidade de inserção tubo a tubo; Facilidade na extração em caso de anomalia (aço ou *liner*).

As principais desvantagens do sistema *Liner* Expandido são: Possibilidade de colapso em relação aos demais sistemas; Dificuldade de retirada do reforço interno da termofusão entre dois tubos de PEAD; Necessidade de expansão do *liner* no duto através do teste pneumático e hidrostático; Monitoramento dos *vent's*; Não permite derivações após *liner* aplicado; Não permite soldagem após *liner* aplicado.

2.6. CRITÉRIOS PARA ESCOLHA DOS DUTOS CANDIDATOS À APLICAÇÃO DO *LINER*

- **Integridade Mecânica**
- Devido às condições estruturais do duto quanto ao nível de corrosão e pressão máxima admissível pelo estado corrosivo em que se encontra, para evitar assim o rompimento do duto e consequentemente um dano ambiental proveniente de um vazamento de petróleo bruto.
- **Relevância**
- Importância do duto no escoamento do petróleo de uma estação coletora para outra ou de um campo de petróleo para outro, evitando assim o custo elevado com transporte de óleo através de carretas pela indisponibilidade do duto.
- **Custos**
- Valor atribuído à instalação do *liner* no duto em detrimento com os gastos devido ao uso de carretas para escoamento da produção, justamente devido à inutilidade deste duto; ou para construção de um novo duto de aço em substituição ao anterior, condenado por elevada corrosão.

3. METODOLOGIA

3.1. AVALIAÇÃO PARA UTILIZAÇÃO DO *LINER* EXPANDIDO DE PEAD EM DUTOS NO RIO GRANDE DO NORTE

De acordo com os critérios empregados para escolha dos dutos candidatos a seleção para

aplicação da técnica de *Liner* Expandido, citados no item anterior, são apresentados no Quadro 1 duas tubulações denominados de Oleodutos AB e CD, onde ambos se enquadraram como aptos para aplicação do revestimento.

Quadro 1 – Dutos selecionados para receber o revestimento de *Liner* Expandido de PEAD no RN

DUTO[5]	DN	PRESSÃO	VAZÃO	TEMP	EXTENSÃO	MOTIVAÇÃO	CUSTO TOTAL
(pol)		(kgf/cm^2)	(mS/dia)	(ºC)	(km)	DO SERVIÇO	(MILHÕES R$)
Oleoduto AB	10	20	780	45	28	Prevenção	11,0
Oleoduto CD	6	20	550	38	15	Reabilitação	4,0

O Quadro 1 mostra um comparativo do custo envolvido na operação de inserção do *Liner* Expandido em PEAD nos dois dutos citados, considerando custos de serviços + custos de materiais, onde os custos de materiais é, em média, equivalente a 60% dos custos dos serviços.

A inserção do *liner* no oleoduto AB teve como motivo a prevenção contra corrosão interna e a relevância deste duto como principal critério para utilização do revestimento em PEAD, visto que essa tubulação é responsável pelo escoamento da produção acumulada de petróleo de 9 (nove) Estações Coletoras no estado. Portanto, a interrupção deste duto por problemas de corrosão iria trazer um transtorno muito grande para a companhia, já que o petróleo produzido deveria ser transportado através de carretas-tanque, o que traria um custo elevado em logística (conforme pode ser visto no Gráfico 1, adiante). Outro grande inconveniente que poderia ocorrer era que o escoamento da produção seria bastante afetado numa hipótese de não haver carretas disponíveis em certo momento, sendo necessário fechar alguns poços até que o transporte fosse reestabelecido, ocasionando assim em prejuízos financeiros pela perda de produção.

No oleoduto CD, a reabilitação com inserção de *liner* expandido foi motivada após uma inspeção com *pig* instrumentado, o qual foram detectadas várias regiões com níveis muito alto de corrosão e até mesmo severa em alguns pontos, tendo como critério a integridade mecânica do duto que estava bastante comprometida, diminuindo consideravelmente a espessura da parede nesses locais específicos. Esse duto estava abandonado temporariamente e o escoamento da produção se dava através do transporte por carretas.

As etapas para instalação do *liner* no duto transcrevem das seguintes etapas: inserção, teste pneumático, fechamento do tramo, teste hidrostático e monitoramento.

3.2. INSERÇÃO DO *LINER* NO DUTO DE AÇO

Previamente necessita-se a abertura de valas nos extremos do duto e também nos trechos intermediários (tramos), em que se permite o corte na tubulação para a soldagem dos flanges de aço, além de permitir o acesso aos tramos, de máquinas e operários, para a inserção do *liner.*

[5] Nome fictício dado às estações coletoras e dutos citados neste trabalho, com o intuito de preservar informações privilegiadas do setor petrolífero no estado.

Um equipamento de suma importância nesta operação é a unidade *Winche* (Figura 3), onde trata-se de um caminhão guincho que deve possuir cabo suficiente para atravessar todo o comprimento do tramo, além de um tambor com velocidade controlável com um freio e dispositivo para bobinar o cabo, um odômetro e um verificador de força de tração exercida na inserção.

Antes da inserção do *liner* em um duto existente é aconselhável passar pelos tramos uma peça de amostra do mesmo material para a verificação de possíveis danos em sua superfície. Portanto, o *liner* não deve ser inserido ao tramo se a peça de amostra estiver danificada. Quando todas as imperfeições e protuberâncias internas do duto forem removidas, deve-se passar novamente a peça de amostra até que a mesma não esteja danificada.

Caso o interior do duto existente seja muito rugoso, é possível reduzir a fricção utilizando um agente de redução de fricção que pode ser um detergente biodegradável. A inserção deverá ser contínua e constante para diminuir as forças de tração.

Depois de concluída a análise do interior do duto de aço, pode-se iniciar a inserção do *liner* neste, inserindo dentro do duto existente um *pig* de poliuretano (Figura 4) que é impulsionado por ar em baixa pressão, o qual levará o cabo de aço da unidade até a outra extremidade do tramo. Após a saída do *pig* na extremidade do tramo, um cabeçote puxador de mesmo material (Figura 5) é termofusionado na extremidade do tubo de PEAD mediante o procedimento de termofusão (que por sua vez já estava termofusionado ao outro tubo, e este a outro, até que se formou em um trecho de *liner*). O cabo é então fixado no cabeçote puxador e acionado pelo *Winche*, começando assim a inserção do *liner* no duto de aço.

Figura 3 – Unidade *Winche*

Figura 4 – Pig de Poliuretano

Figura 5 – Cabeçote Puxador

Fonte: Arquivo Pessoal.

O aumento da velocidade deve ser de maneira compatível com a operação de arraste, controlando a tensão de tração para que a mesma não exceda 70% do limite de escoamento do plástico, evitando assim danos ao *liner.*

Quando o *liner* atravessar todo o trecho do duto e sair pelo outro extremo, é necessário

tracionar de modo a alongar o revestimento de PEAD, deixando um excesso no comprimento e fixando-o com uma abraçadeira de fixação, chamada de Clamp (Figura 6). Com tal procedimento, é possível realizar o fechamento do tramo mediante a instalação, através de soldagem de topo por termofusão, de um *Stub End* (SE) em cada extremidade (Figura 7). Uma vez recuperada sua condição elástica, o *liner* retrai fazendo com que o ressalto do *Stub End* fique em contato com a face do flange de aço (Figura 8) que passa a funcionar como junta de vedação.

Figura 6 – Clamp

Figura 7 – *Stub End (SE)*

Figura 8 – SE em contato c/ flange

Fonte: Arquivo Pessoal.

3.3. TESTE PNEUMÁTICO E FECHAMENTO DO TRAMO DO *LINER*

Para comprovar a estanqueidade do sistema, o *liner* deve passar por um teste pneumático a baixa pressão (6 a 8 kgf/cm^2) durante um período de tempo, na qual revelará qualquer irregularidade nas juntas termofundidas ou até mesmo defeitos de fábrica dos tubos de polietileno. Tais danos são detectados pela queda de pressão e a perda de fluído através dos *vent´s*. Com isso, se faz necessário à remoção do *liner* para repará-los. Logo após deve inseri-lo novamente no duto e voltar a realizar o teste pneumático. (ABPE/P016, 2006).

O teste de estanqueidade pneumática no *liner* deve ser iniciado somente depois de decorridas 24 horas da execução da última solda, e a temperatura não poderá ser menor que 5°C e maior que 60°C. O tramo a ser testado deve ser isolado com tampões, adequadamente dimensionados e ancorados para suportar as pressões do teste. As extremidades do tubo deverão possuir dispositivos para pressurização, medição de pressão e purga após realização do ensaio. (ABPE/P016, 2006).

O fechamento de cada trecho dos tubos se efetuará mediante a instalação de um *Stub End* (Figura 10) em cada extremo do trecho seguindo o procedimento de termofusão, os quais ficam ajustados fortemente às faces dos flanges de aço, como foi dito anteriormente. Em cada tramo uma vez instalados os dois *Stub End´s*, realiza- se o teste de pressão pneumática. (ABPE/P016, 2006).

Concluída a instalação dos *Stub End´s* e o teste pneumático em todos os tramos, procede-se a união de cada tramo ao imediato adjacente, conectando os flanges de aço entre si, através da fixação de parafusos e porcas, utilizando técnicas de torque convencionais (Figura 9). Um anel de fechamento de aço carbono, chamado de Anel Limitador de Torque (Figura 10), será instalado entre cada par de flanges de aço, acoplando-se nos ressaltos do mesmo e, por fora do diâmetro do *Stub End* e por dentro do círculo de parafusos. A

espessura do Anel Limitador de Torque deve ser cerca de 20% menor que a espessura da junção dos dois *Stub End´s*. (ABPE/P016, 2006).

Figura 9 – União de Tramos

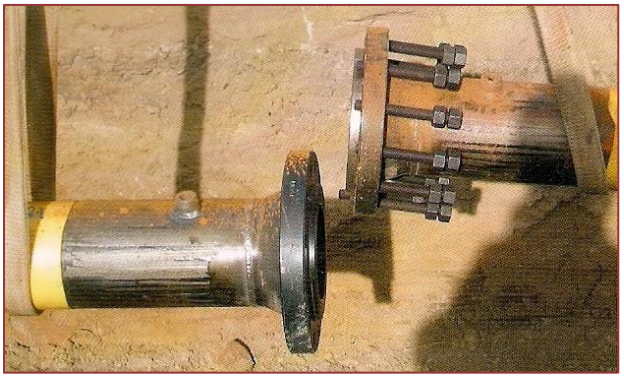


Figura 10 – Anel Limitador de Torque

Fonte: Arquivo Pessoal.

3.4. TESTE HIDROSTÁTICO DO *LINER*

Após o fechamento dos tramos, é necessária a realização do Teste Hidrostático com o intuito de verificar a integridade física do sistema e expandir a tubulação de PEAD até o contato com a superfície interna da tubulação de aço. O Teste Hidrostático pode ser realizado de uma só vez em mais de um tramo, dependendo da potência da bomba utilizada nesse teste. Todos os *vent´s* devem permanecer abertos para a eliminação do ar contido no anular entre a tubulação de polietileno e o duto de aço. A pressão de Teste Hidrostático deverá ser definida como sendo para o aço, ou seja, uma vez e meia a pressão de projeto da tubulação de aço na temperatura de operação. (ABPE/P015, 2005).

Ainda de acordo com o Procedimento ABPE/P015 - Tubulações de Polietileno - Execução de Ensaio de Estanqueidade Hidrostática (2005), para o teste hidrostático, deve-se proceder ao enchimento da linha lentamente, garantindo toda a expulsão do ar do interior do duto. Quando a linha estiver completamente cheia, os *vent´s* e/ou dispositivos de purga de ar devem ser fechados e, a seguir, a linha é pressurizada até a pressão nominal ou de projeto da tubulação, que deve ficar estabilizada por no mínimo 3 horas.

Quando a pressurização da linha é iniciada, a pressão deve ser elevada com uma razão de aumento o mais constante possível até a pressão final do teste hidrostático. Após o teste e a expansão da tubulação de PEAD até o contato com a parede interna da tubulação de aço, os *vent´s* deverão ser fechados e permanecerem fechados.

3.4.1. MONITORAMENTO DO TESTE HIDROSTÁTICO DO *LINER*

Quando a pressão do teste atingir o valor calculado, a válvula de entrada de água deverá ser fechada. O tempo decorrido (T_L) do instante inicial da pressurização até atingir a pressão de teste deve ser anotado. Se este tempo for menor que 10 minutos, considere T_L igual a 10 minutos. Durante a pressurização do sistema até a pressão do teste, os valores de tempo e pressão devem ser monitorados e registrados para uma análise de danos e falhas, caso isso venha a acontecer, conforme orientações do Procedimento

APBE/P015 - Tubulações de Polietileno - Execução de Ensaio de Estanqueidade Hidrostática (2005).

3.5. TÉCNICA DE MONITORAMENTO DO *LINER* DURANTE OPERAÇÃO DO DUTO

Uma das principais desvantagens do Sistema *Liner* é a possibilidade de colapso. Este imprevisto pode ocorrer devido à permeabilidade do gás natural através da parede dos tubos de PEAD, quando o mesmo é usado em gasodutos ou até mesmo em oleodutos onde o gás está associado ao óleo produzido pelos poços de um campo de produção. Isso se deve ao fato que o polietileno é permeável ao gás natural. (Mano, 1991).

A passagem desse gás pela tubulação de polietileno durante certo período ocasiona a formação de uma bolsa de gás no anular da tubulação de PEAD e a tubulação de aço que, com o aumento da temperatura e o aumento da pressão, tal bolsa expande colapsando então o *liner.* (Mano, 1991).

Para evitar o colapso, é necessária a operação constante de purga do gás acumulado no anular, através dos *vent´s*. O grande problema é não existir uma forma de medição da quantidade de gás acumulado. Na tentativa de sanar ou minimizar este efeito, os *vent´s* de cada união de tramos podem ser interligados entre si através de um *tubbing* (ou tubo de instrumentação) e conectados a um PIT (Transmissor Indicador de Pressão), onde o mesmo emite um sinal elétrico ou através de radares, que é captado por um supervisório localizado na sala de operação. Com isso, o operador detecta uma elevada pressão no alunar, podendo assim deslocar-se até o local e fazer a purga adequadamente.

3.6. COMPARATIVOS DE CUSTOS PARA OS DOIS CASOS DE REABILITAÇÃO DE DUTOS COM *LINER* EXPANDIDO NO RIO GRANDE DO NORTE

Para inserção do *liner*, os dutos foram seccionados em trechos de 1 km, em média, conforme procedimento citado no item 4.1, considerando o relevo do terreno assim como os melhores pontos físicos (baseados na localização geográfica) de instalação dos *vent´s* para verificação da pressão no anular entre a parede interna do duto e a parede externa do *liner*.

Para construir um novo duto em aço, nos dois casos citados no Quadro 1, o custo envolvido giraria em torno de 25 milhões de reais para o duto AB e 8 milhões de reais para o duto CD. Vale salientar que o custo para reabilitação de dutos com inserção de liner é cerca de 50 a 60% menor (dependendo do diâmetro) do que construir um novo duto em aço.

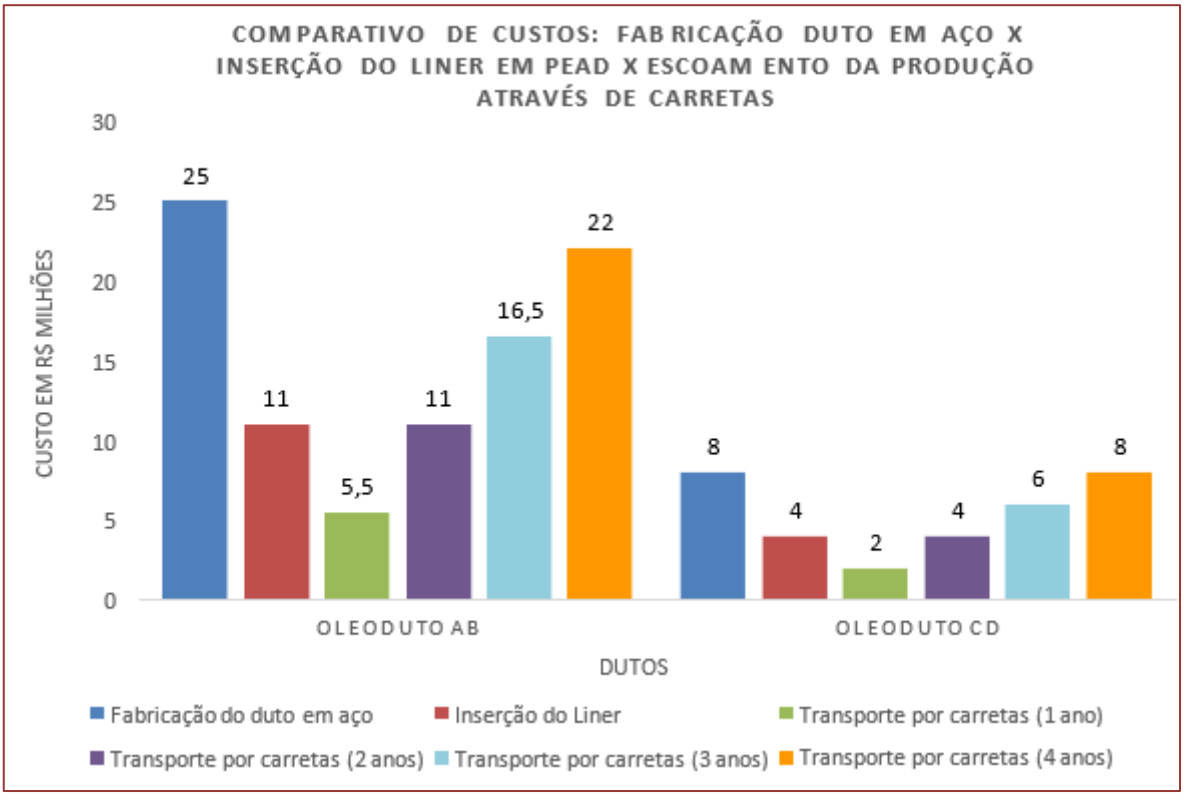
Considerando que os dois oleodutos do Quadro 1 estivessem com sua operação interrompida devido a problemas por corrosão que comprometia a integridade mecânica de ambos e que, neste caso, para o escoamento de toda a produção, a companhia de petróleo optaria por fazer através do transporte por carretas-tanque. Portanto, calculando os custos para cada duto devido ao escoamento da sua produção através de carretas, a companhia teria o seguinte ônus, conforme Tabela 4 abaixo:

Tabela 4 – Custos para escoamento da produção através de transporte por carreta-tanque

Duto	Extensão (Km)	Volume Escoado (bbl/dia)	Custo por carreta tanque (R$/km rodado)	Volume Escoadao (bbl)	Quantidade carreta para esocoar a produção (dia)	Custo diário com Transporte (R$)	Custo anual com transporte (MILHÕES R$)
AB	28	4905	20	180	27,25	15260	5,5
CD	15	3460	20	180	19,22	5766	2,0

O Gráfico 1 a seguir, elaborado através dos dados fornecidos do Quadro 1 e Tabela 4, ilustra um comparativo de custos entre a fabricação de um duto novo em aço, a inserção do *liner* de PEAD nos mesmos, e o escoamento da produção de cada duto através de carretas.

Gráfico 1 – Comparativo de custos



Analisando o gráfico, nota-se que após 2 (dois) anos transportando a produção através de carretas, a despesa com esse inconveniente é equivalente ao custo de reabilitação do duto com a inserção do *liner* expandido de PEAD, tanto para o oleoduto AB como para o oleoduto CD. Após 3 (três) anos, os custos com transporte de carreta ultrapassam o investimento para inserção do *liner*, enquanto que, ao quarto ano os valores envolvidos é praticamente equivalente ao custo de fabricação de um novo duto em aço com as mesmas

características do anterior.

Portanto, pode ser observado que há viabilidade econômica e operacional quanto à utilização do *liner* nesses dois exemplos, baseando-se no comparativo de custos entre construir um novo duto ou reabilitar/proteger o duto existente, como também evitando transtornos para companhia no caso da necessidade de retirar de operação os dutos devido à corrosão acentuada na tubulação de aço.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização do *Liner* Expandido é uma técnica que incrementa a vida útil de um duto, evitando gastos prematuros com a substituição do mesmo devido à corrosão e a abrasão interna, além de diminuir o atrito na superfície interna da tubulação, trazendo alguns benefícios como a diminuição da perda de carga no sistema. Uma redução de 33% no coeficiente de atrito, por exemplo, irá resultar numa redução de 8% no diâmetro nominal do tubo em sistemas que operam com óleo e gás. Na prática, a faixa real de aumento da vazão é de 5 a 10%, chegando a 25% em tubos de pequenos diâmetros. Essa prática também pode ser comprovada com base em experiências de campo, além de confirmações matemáticas através dos cálculos hidráulicos utilizando as fórmulas aqui citadas. Portanto, devido à superfície do PEAD ser mais suave do que a do aço novo, a vazão é incrementada porque a rugosidade baixa destes materiais permitem uma maior capacidade de vazão e um menor coeficiente de atrito, o que permite utilizar um menor diâmetro que o aço, mantendo as mesmas características do fluxo. Isso se deve ao fato porque o PEAD, utilizado no Sistema *Liner*, possui como principais características: uma baixíssima rugosidade, resistência à maioria dos agentes químicos, imunidade total a corrosões eletrolíticas e galvânicas, baixíssimo efeito de incrustações, além de uma elevada resistência ao impacto e elevada vida útil (mais de 50 anos).

Diante dos benefícios destacados acima e tomando por base as experiências de campo nos casos citados anteriormente, pode-se concluir o quão vantajoso é o uso da tecnologia do *Liner* Expandido em PEAD porque este sistema: elimina a corrosão interna; não agride ao meio ambiente porque na falha do *liner*, o fluído fica contido na tubulação de aço; reduz a passagem de pig de limpeza; elimina a inspeção por pig instrumentado; elimina a injeção de inibidor de corrosão; elimina a junta isolante do lançador e recebedor de pig; elimina o monitoramento da corrosão interna por cupom; melhora a capacidade de escoamento do fluído; e diminui os custos de manutenção no duto de aço; além da reabilitação *"in situ"* de dutos com corrosão interna.

O investimento para proteger as paredes internas de um duto para escoamento de petróleo e gás com a inserção do revestimento de polietileno de alta densidade (PEAD) permitiu confirmar também que é bem justificado, comparando com os custos para fabricação de um novo duto em aço ou com os gastos para escoamento da produção através de carretas, no caso da interrupção da operação deste duto devido ao alto índice de corrosão.

REFERÊNCIAS

[1] ABPE. ABPE/P015 - Tubulações de Polietileno - Execução de Ensaio de Estanqueidade Hidrostática. ABPE - Associação Brasileira de Tubos Poliolefínicos e Sistemas, Outubro, 2005.

[2] ABPE. ABPE/P016 - Tubulações de Polietileno - Execução de Ensaio de Estanqueidade Pneumática. ABPE - Associação Brasileira de Tubos Poliolefínicos e Sistemas, Março, 2006.

[3] GAMA, Gilson C. Revestimentos Orgânicos. Disponível em: <http://revestimentosorganicos.blogspot.com/p/corrosao.html>. Acessado em: 25 maio 2019.

[4] GENTIL, V. Corrosão. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007. 353 p.

[5] MANO, Eloisa Biasotto. Polímeros como materiais de engenharia. São Paulo: Edgard Blücher, 1991. 197 p.

[6] ABPE. Manual de boas práticas. Módulo 1 - Métodos de união de tubos poliolefinicos. 2013.

[7] ABPE. Manual de boas práticas. Módulo 4 - Procedimentos de solda de topo. 2013.

[8] GRUPO BRASTUBO. Manual Técnico do Polietileno. São Paulo: GRUPO BRASTUBO, 2001. 62 p.

[9] THOMAS. Fundamentos de Engenharia do Petróleo. Rio de Janeiro: Interciência, 2002. p. 81-87.

[10] WIKILIVROS. Mecânica dos Fluidos. Disponível em: <https://pt.wikibooks.org/wiki/Mecânica_dos_fluidos/Cálculo_da_perda_de_carga_em_tubulações>. Acessado em: 30 jun. 2019

Capítulo 8

Resistência e alongamento em têxteis: análise das padronagens em tela, sarja e cetim[1]

Alessandra Brandani Biggi
Elaine Regina Brito Maia Mercial
Suellen Dias Bernardes
Ricardo Yuta Negri Sakata
Maria Renata Moraes
Washington Luiz Félix Santos

Resumo: Este capítulo explora a resistência à tração e o alongamento de tecidos têxteis, com ênfase na influência de fatores estruturais como o tipo de fibra, densidade, gramatura e padronagem. Com base nas normas da ABNT, foram realizados testes para compreender como essas variáveis impactam as propriedades mecânicas dos tecidos, fundamentais para garantir a qualidade e a durabilidade de produtos têxteis. Para o estudo, foram selecionados trinta tecidos classificados em três padronagens principais: tela, sarja e cetim. Os resultados demonstraram que os tecidos de tela apresentaram menor resistência à tração e alongamento, devido à simplicidade de sua estrutura, que resulta em baixa densidade e gramatura. Em contraste, os tecidos de sarja mostraram maior resistência, atribuída à sua configuração diagonal e gramatura mais elevada. Já o cetim destacou-se pelo maior alongamento, resultado de sua alta densidade de fios, composta predominantemente por poliéster e elastano. Outro ponto observado foi a direção do esforço aplicado: em todos os casos analisados, a resistência à tração foi superior no sentido do urdume. Esses achados ressaltam a importância dos aspectos estruturais na definição das propriedades mecânicas dos tecidos, fornecendo subsídios importantes para a indústria têxtil no desenvolvimento de materiais com desempenho otimizado.

Palavras-chave: resistência à tração, alongamento, padronagens têxteis.

[1] Este trabalho foi realizado com apoio do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), em parceria com a Fundação Araucária (FA) e a Universidade Estadual de Maringá (UEM).

1. INTRODUÇÃO

A busca por qualidade é universal e amplamente associada a características positivas, como durabilidade, conforto e funcionalidade. Ao adquirir um produto têxtil, o consumidor espera que o tecido seja resistente ao uso, mantenha sua integridade após múltiplas lavagens e não apresente deformações ou perda de cor. Dessa forma, a qualidade, no âmbito têxtil, está intrinsecamente vinculada ao desempenho do material ao longo do tempo (Mello, 2011).

No contexto industrial, o controle de qualidade têxtil transcende a simples identificação de defeitos em produtos acabados. Trata-se de um sistema meticuloso adotado pelas empresas para aprimorar processos produtivos e garantir que os tecidos atendam às exigências dos consumidores durante o uso. Essa abordagem inclui análises rigorosas de características estruturais e mecânicas que determinam a funcionalidade do material (Fodra *et al.,* 2021).

Entre os critérios de avaliação, a resistência à tração e o alongamento emergem como propriedades cruciais para a durabilidade e conforto dos tecidos. Esses parâmetros mecânicos desempenham um papel determinante na qualidade e no desempenho dos produtos têxteis, seja na confecção de vestuário, na fabricação de têxteis técnicos ou em materiais industriais (SENAI, 2015).

A resistência à tração reflete a capacidade de um tecido suportar forças aplicadas que buscam esticá-lo ou deformá-lo, enquanto o alongamento mede sua flexibilidade diante dessas tensões, permitindo que o material se estique sem romper (Hossain *et al.,* 2023).

No universo têxtil, essas propriedades desempenham papéis fundamentais: a resistência à tração assegura a robustez e a durabilidade dos tecidos, enquanto o alongamento oferece conforto e liberdade de movimento, características indispensáveis para atender às expectativas do consumidor final.

Compreender essas características possibilita que designers e engenheiros têxteis desenvolvam materiais adaptados a diferentes necessidades e aplicações. Este capítulo investigará os fatores estruturais que influenciam essas propriedades, como tipo de fibra, densidade, gramatura e padronagem, destacando sua relevância para a indústria têxtil.

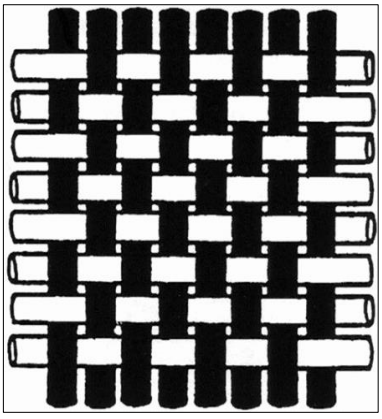
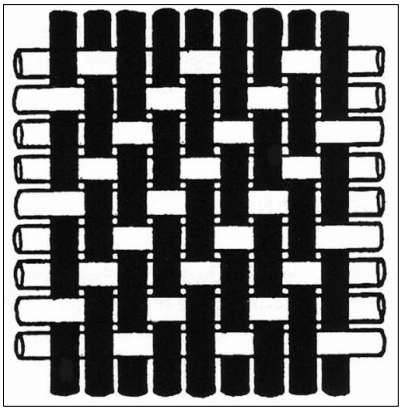
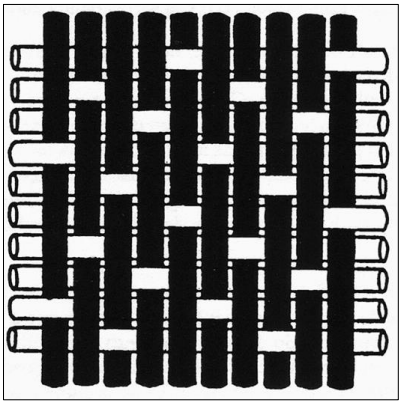
2. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo, foram selecionados 30 tecidos, distribuídos proporcionalmente entre as três padronagens fundamentais da tecelagem:

- ✓ Tela: estrutura de ligamento básico, que consiste em uma única passagem da trama por cima e por baixo de cada fio de urdume. Resulta em um tecido com superfície lisa, geralmente feito de algodão.
- ✓ Sarja: a passagem da trama é realizada por cima e por baixo de dois ou mais fios de urdume. Resulta em um tecido com uma superfície diagonal, também predominante em algodão.
- ✓ Cetim: a passagem da trama é realizada por cima de vários fios de urdume antes de passar por baixo de um fio de urdume. Resulta em um tecido com superfície brilhante e suave. Frequentemente produzido com fibras sintéticas, como o poliéster.

Na Tabela 1, são apresentadas as padronagens investigadas neste estudo, acompanhadas de uma amostra representativa dos tecidos analisados.

Tabela 1. Estruturas das amostras de tecidos analisadas

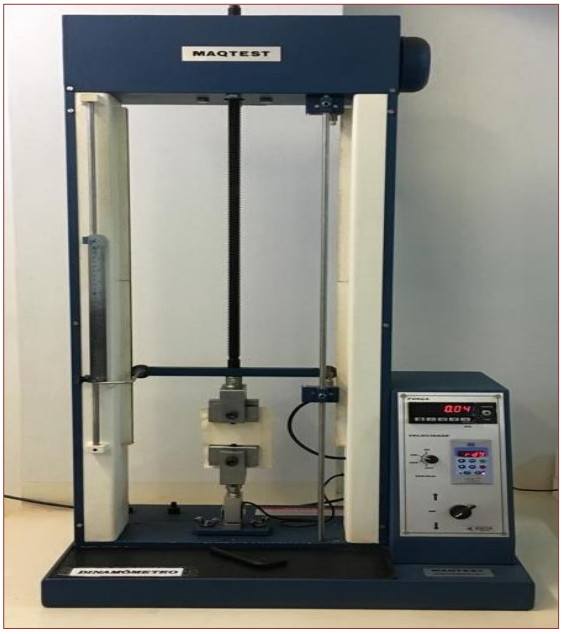
Padronagem	Amostra Representativa de um Tecido Analisado
DIAGRAMA DO TECIMENTO TIPO TELA 1x1: 	
DIAGRAMA TECIMENTO TIPO SARJA Curso 3 - 2x1: 	
DIAGRAMA TECIMENTO TIPO CETIM CURSO 5 – ESCALADO 2 POR URDUME: 	

Os tecidos analisados passaram pelo processo de acabamento (lavagem, desengomagem e tingimento) para assegurar a uniformidade das amostras. É importante ressaltar que os tecidos não possuem aplicação de resinas ou outros tratamentos adicionais que poderiam influenciar os resultados obtidos nos testes de resistência à tração e alongamento.

Para a identificação das fibras têxteis, foi utilizada a norma ABNT Nbr 13538 (ABNT, 1995). A determinação da densidade dos tecidos seguiu os procedimentos descritos na norma ABNT Nbr 10588 (ABNT, 1988). Já a gramatura dos tecidos foi avaliada conforme os padrões estabelecidos pela norma ABNT Nbr 10591 (ABNT, 1989). Por fim, os testes de resistência à tração e alongamento foram realizados de acordo com os métodos definidos na norma ABNT Nbr ISO 13934-2 (ABNT, 2013).

A pesquisa foi conduzida na Universidade Estadual de Maringá, no Departamento de Engenharia Têxtil no laboratório de controle de qualidade têxtil. A Figura 1 ilustra o equipamento utilizado para avaliar a resistência à tração e o alongamento dos tecidos, empregando o método Grab.

Figura 1. Dinamômetro Maqtest. O equipamento está configurado com uma amostra de tecido da pesquisa, destacando o processo experimental adotado no estudo



3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. PROPRIEDADES DOS TECIDOS

Os resultados das propriedades dos tecidos estão apresentados nos Quadros 1, 2 e 3, proporcionando uma análise detalhada dos dados obtidos.

Quadro 1. Propriedades do tecido – Tela

Tela								
Tecido	**Composição ***	**Gramatura (g/m²)**	**Densidade Urdume (colunas/ cm)**	**Densidade Trama (carreiras /cm)**	**Pico máx. Kfg Urdume**	**Pico máx. Kfg Trama**	**Alongamento Urdume (%)**	**Alongamento Trama (%)**
1	100%CO	84,4	22	12	49,4	23,8	8,9	1,4
2	100%CO	84,7	22,0	12,0	44,6	21,3	8,7	17,1
3	100%CO	75,0	38,0	18,0	42,4	36,8	33,4	21,1
4	100%CO	82,6	22,0	13,0	41,7	20,0	8,8	12,7
5	100%CO	85,0	22,0	13,0	46,3	23,4	15,0	15,6
6	100%CO	82,0	22,0	12,0	45,2	23,0	10,5	29,8
7	100%CO	82,8	22,0	13,0	46,2	20,6	8,0	15,7
8	100%CO	118,6	40,0	18,0	72,4	26,4	13,6	21,8
9	100%CO	84,5	22,0	13,0	46,8	22,7	8,1	17,4
10	100%CO	84,2	22,0	12,0	43,0	22,7	7,5	16,7
Média	100% CO	86,38	25,4	13,6	47,8	24,07	12,25	16,93

CO*: algodão

Quadro 2. Propriedades do tecido – Sarja

Sarja								
Tecido	**Composição ***	**Gramatura (g/m²)**	**Densidade Urdume (colunas/ cm)**	**Densidade Trama (carreiras/cm)**	**Pico máx. Kfg Urdume**	**Pico máx. Kfg Trama**	**Alongamento Urdume (%)**	**Alongamento Trama (%)**
1	100%CO	311,0	25,0	16,0	86,5	75,3	41,9	23,8
2	100%CO	322,3	30,0	17,0	150,8	88,0	30,6	16,6
3	100%CO	396,2	21,0	16,0	162,7	114,1	44,1	26,4
4	100%CO	348,9	26,0	17,0	178,8	75,2	48,9	21,3
5	100%CO	351,1	27,0	18,0	186,7	105,9	49,6	21,1
6	100%CO	348,1	18,0	15,0	172,3	82,6	41,6	21,5
7	100%CO	366,294	29	18	152,96	123,12	39,8	22,1
8	100%CO	350,9	26,0	18,0	168,1	87,3	42,3	22,4
9	100%CO	332,4	25,0	19,0	182,7	109,4	35,2	23,3
10	100%CO	350,9	26,0	18,0	168,1	87,3	42,3	22,4
Média	100% CO	347,81	25,3	17,2	160,97	94,82	41,63	22,09

CO*: algodão

Quadro 3. Propriedades do tecido – Cetim

Cetim								
Tecido	**Composição**	**Gramatura (g/m²)**	**Densidade Urdume (colunas/ cm)**	**Densidade Trama (carreiras/cm)**	**Pico máx. Kfg Urdume**	**Pico máx. Kfg Trama**	**Alongamento Urdume (%)**	**Alongamento Trama (%)**
1	97%PES** 3% PUE***	87,73	83	37	104,2	38,54	50,356	27,465
2	97%PES 3% PUE	95,06	57	32	133,94	82,53	61,67	24,976
3	100% PES	76,57	62	44	65,28	38,52	13,676	23,696
4	100% PES	121,74	40	25	165,45	137,64	34,802	28,285
5	100% PES	199,44	40	25	174,03	64,173	49,55	25,65
6	100% PES	74,83	76	33	132,42	67,22	33,92	29,55
7	100% PES	71,88	82	25	130,18	52,97	56,11	25,09
8	97%PES 3% PUE	90,89	86	28	112,94	74,9	31,33	35,286
9	98%PES 2% PUE	89,4	82	25	122,6	66,4	66,42	34,27
10	100% PES	71,61	87	29	118,06	65,48	49,89	30,49
Média	99% PES 1% PUE	88,565	79	28,5	126,39	65,9	49,72	27,875

PES**: Poliéster; PUE***: Elastano

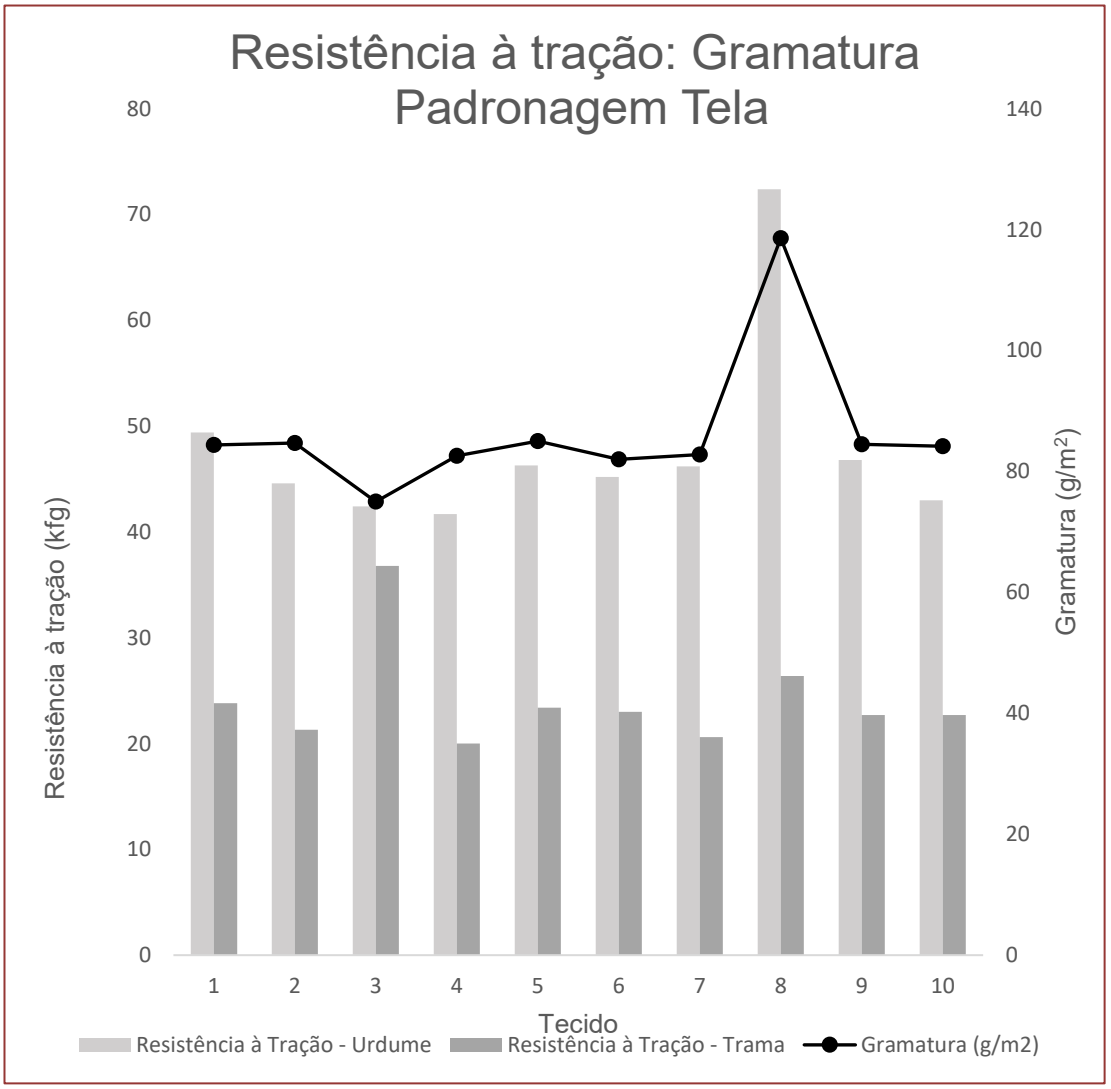
Com base nos resultados apresentados nos Quadros 1, 2 e 3, as análises de resistência à tração e alongamento serão abordadas a seguir, organizadas conforme as propriedades estruturais: gramatura, padronagem e fibra, densidade e alongamento. Essa metodologia facilitou a identificação de padrões, além de proporcionar uma análise mais aprofundada das relações entre as propriedades físicas e o desempenho mecânico.

3.2. GRAMATURA

A gramatura têxtil é uma medida que representa a massa de um tecido, em gramas, por metro quadrado. Essa característica é um indicador direto de sua densidade ou espessura, sendo que tecidos com maior gramatura tendem a ser mais pesados e espessos (Maluf e Kolbe, 2003).

A relação entre gramatura e resistência à tração, embora não seja linear e varie conforme fatores como tipo de fibra, padronagem e tratamentos aplicados, pode ser interpretada de maneira simplificada: tecidos com maior gramatura geralmente apresentam maior resistência à força necessária para rasgá-los ou deformá-los (Yashodhakumari *et al.,* 2018). Essa interação é demonstrada no Gráfico 1 com a padronagem tela, onde a conexão entre gramatura e resistência à tração se torna evidente. Esse comportamento pode ser observado nos três tipos de estruturas (tela, sarja e cetim) nos resultados apresentados nos Quadros 1, 2 e 3.

Gráfico 1. Análise da resistência à tração: Influência da Gramatura – Padronagem Tela



Conforme ilustrado no Gráfico 1, observa-se que tecidos com maior resistência à tração também apresentam valores mais elevados de gramatura. Essa correlação é particularmente evidente no tecido 8. A elevada densidade de fios por unidade de área (gramatura) conferiu a esse tecido uma estrutura significativamente mais resistente, dificultando a separação das fibras quando submetidas a esforços de tração. Esse padrão de comportamento está alinhado com os resultados encontrados nos estudos de Schmitt Lunkes e Folle (2021).

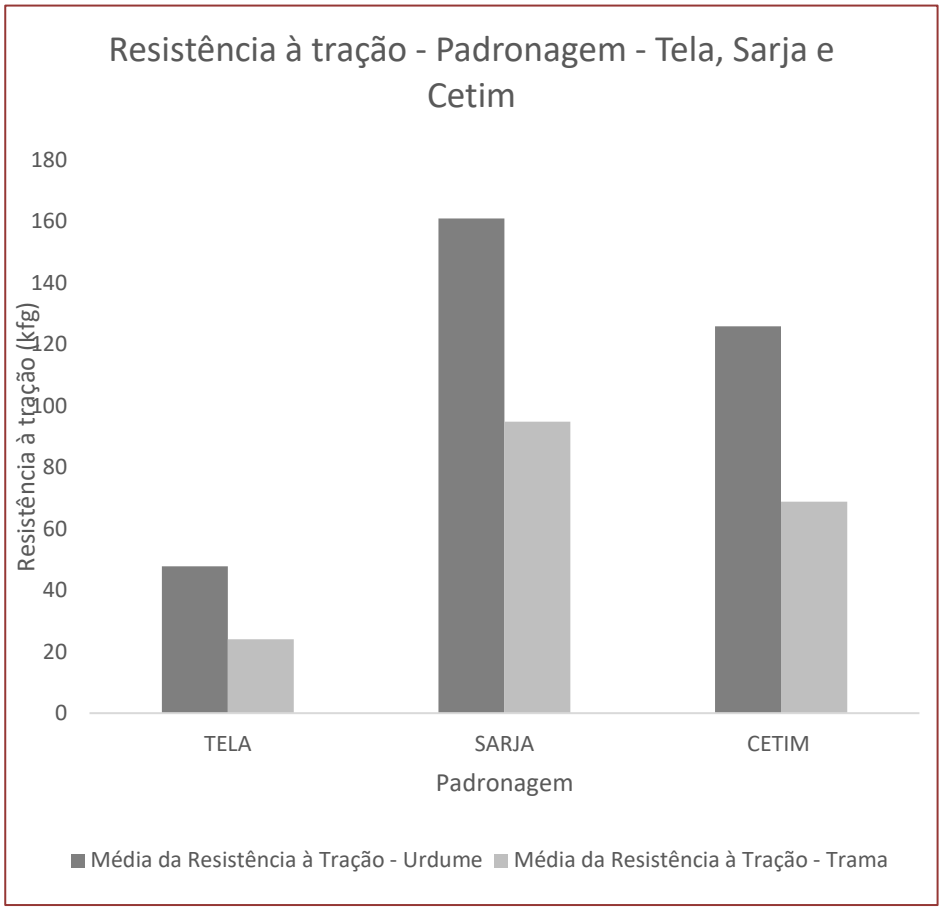
3.3. PADRONAGEM E FIBRA

A padronagem têxtil é a forma como os fios de urdume (longitudinais) se cruzam com fios de trama (transversais) para formar o tecido plano. Esse cruzamento não é realizado de forma aleatória, segue padrões específicos, por isso a designação padronagem.

A padronagem define a aparência, textura, aplicação final e tem influência nas propriedades final do tecido, como resistência (Gabrijelčič, *et al.,* 2008). No Gráfico 2, são

apresentadas as médias de resistência à tração das padronagens tela, sarja e cetim nas direções do urdume e trama.

Gráfico 2. Análise da resistência à tração: Influência da Padronagem e Fibra – Tela, Sarja e Cetim



O Gráfico 2 revela um ponto crucial sobre a resistência dos tecidos: a padronagem tela demonstrou os menores valores médios de resistência à tração, tanto no sentido do urdume (comprimento) quanto da trama (largura), em comparação com as estruturas sarja e cetim. Embora a padronagem tela confira uma resistência fundamental ao manter a integridade do tecido, sua capacidade de suportar forças de tração elevadas é geralmente inferior à observada nas padronagens sarja e cetim.

Essa característica de menor resistência está intrinsecamente ligada à simplicidade e uniformidade da sua construção. Na padronagem tela, os fios de urdume e trama se cruzam de forma direta, em ângulos próximos a 90 graus. Essa arquitetura, embora básica e coesa, implica que a força aplicada ao tecido tende a se concentrar nos pontos de cruzamento. Ao contrário de estruturas mais complexas, a maneira como os fios se cruzam na tela não otimiza a distribuição da força de tração, a tensão se concentra nesses nós de cruzamento, tornando-os pontos de potencial ruptura mais vulneráveis (Nassif e Ali, 2012).

Conforme evidenciado no Gráfico 2, a padronagem sarja se destacou ao apresentar os maiores valores de resistência à tração, tanto no sentido do urdume quanto da trama. Esse mesmo desempenho superior foi constatado nas pesquisas de Hossain et al. (2023), reforçando a robustez dessa estrutura.

A explicação para essa notável resistência reside no seu padrão de cruzamento diagonal. Diferentemente da tela, onde os fios se cruzam de forma perpendicular, e do cetim, com seus longos "flutuadores" de fio, a sarja caracteriza-se por um padrão em que um fio passa por cima de um ou mais fios adjacentes em uma direção, e depois por baixo de um ou mais fios, criando linhas diagonais distintas na superfície do tecido.

Essa estrutura de cruzamento diagonal confere à sarja diversas vantagens em termos de resistência:

- ✓ Maior Compactação: O padrão diagonal permite que os fios fiquem mais próximos uns dos outros, resultando em uma estrutura mais densa e coesa. Essa compactação dificulta o movimento dos fios sob tensão, aumentando a força necessária para separá-los e, consequentemente, para romper o tecido.
- ✓ Distribuição Uniforme da Força: Quando uma força de tração é aplicada a um tecido de sarja, o entrelaçamento diagonal atua como um sistema de distribuição. A tensão não se concentra em pontos isolados de cruzamento, como na tela, mas é distribuída de maneira mais uniforme ao longo do percurso inclinado dos fios. Essa dissipação da força minimiza a probabilidade de ruptura em um ponto específico, tornando o tecido mais resistente.
- ✓ Maior Resistência Intrínseca: A própria natureza do cruzamento diagonal confere uma maior resistência à deformação e ao alongamento. Os fios "acompanham" a direção da força de maneira mais gradual, absorvendo o estresse de forma mais eficaz (Fung, 2000).

Embora o cetim seja conhecido por sua textura suave e agradável ao toque, sua aparência delicada e seu brilho característico, ele não exibe os padrões estruturais distintos da tela (com seu entrelaçamento simples e uniforme) ou as linhas diagonais da sarja. Surpreendentemente, a análise apresentada no Gráfico 2 revelou que o cetim investigado possuí valores maiores de resistência à tração quando comparados a estrutura tela. Essa capacidade de resistir ao estiramento e à ruptura está fortemente relacionada a dois fatores principais: a alta densidade de fios utilizados em sua construção e o tipo específico de fibra empregada (Maluf e Kolbe, 2003).

Embora o poliéster, matéria-prima predominante nos tecidos de cetim analisados neste estudo, seja uma fibra sintética com alta resistência intrínseca e durabilidade, sua estrutura apresenta menos pontos de ligação entre os fios, o que limita sua capacidade de distribuir forças de tração de maneira uniforme. Por outro lado, a padronagem sarja, mesmo composta por algodão, uma fibra de resistência moderada, demonstra maior resistência à tração em comparação ao cetim. Essa superioridade se deve à arquitetura da sarja, que otimiza a integração entre os fios e melhora a distribuição das tensões ao longo do tecido, tornando-o mecanicamente mais robusto e adequado para aplicações que exigem maior durabilidade e resistência.

Esse mesmo padrão foi observado no estudo de Ferdous *et al.,* (2014), que atribuiu essa menor resistência às maiores "flutuações" na estrutura da trama do cetim. Essas "flutuações" referem-se aos trechos mais longos dos fios da trama que passam por cima de vários fios do urdume (ou vice-versa) antes de um ponto de cruzamento. Essa

característica estrutural, que contribui para a maciez e o brilho do cetim, pode, em contrapartida, tornar o tecido menos resistente à tensão em certas direções, especialmente quando comparado ao entrelaçamento mais firme e compacto da sarja.

Para concluir, uma característica adicional notável no Gráfico 2 é a diferença na resistência à tração entre as direções da trama e do urdume, com a trama apresentando valores inferiores. A Tabela 2 quantifica essa diferença, revelando que, em média, a resistência à tração na direção da trama é cerca de 45% menor do que na direção do urdume. Essa tendência direcional é consistente com os achados da pesquisa de Jahan (2017).

Tabela 2. Comparação da resistência à tração nas direções de urdume e trama

Padronagem	Diferença média percentual entre a resistência à tração nas direções de urdume e trama (%)
TELA	49,64
SARJA	41,09
CETIM	45,33
MÉDIA	45,35

Fonte: Autores.

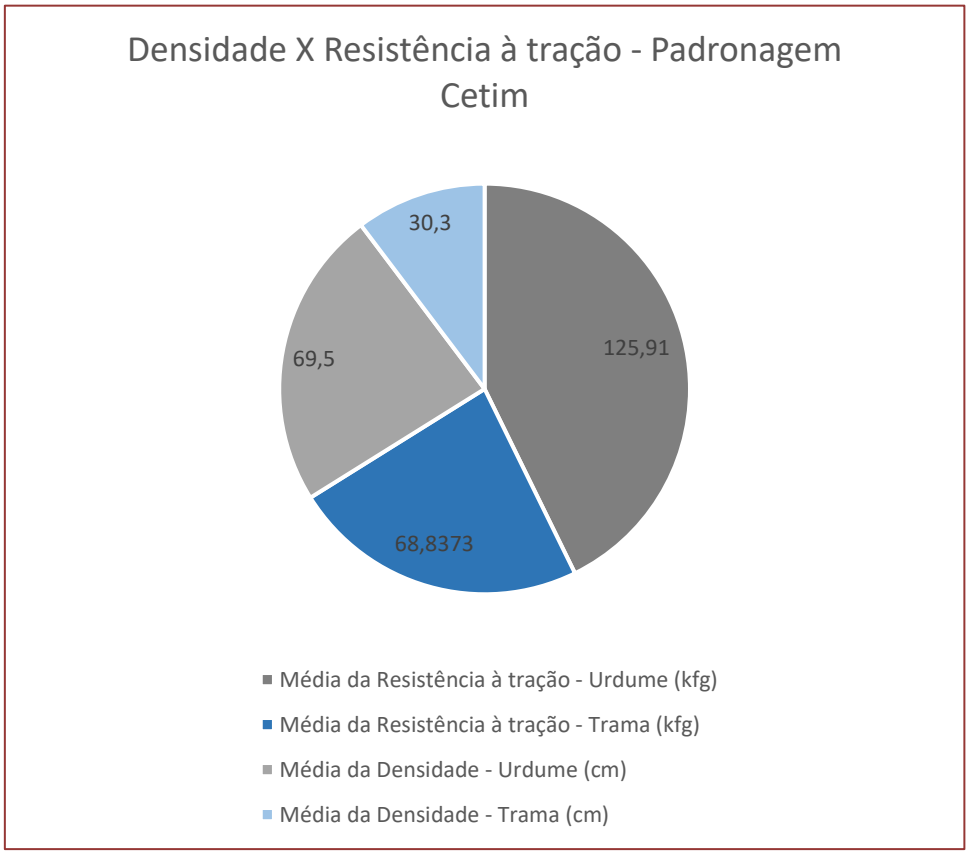
Durante a fabricação do tecido, o processo de tecimento impõe diferentes níveis de tensão aos fios. Em comparação com os fios de trama, que são inseridos transversalmente, os fios de urdume enfrentam maiores desafios durante o processo de tecimento. Enquanto os fios de urdume precisam suportar a tensão contínua do tear e são, por isso, frequentemente reforçados pelo dimensionamento para aumentar sua firmeza, os fios de trama não são submetidos ao mesmo nível de esforço. Além disso, a disposição dos fios no tecido final também contribui para essa diferença de resistência. Os fios de urdume tendem a ser mais retos, com menor ondulação, o que permite que ofereçam maior resistência imediata quando o tecido é esticado nessa direção. Já os fios de trama, com sua maior curvatura devido ao entrelaçamento, precisam primeiro se endireitar sob tensão, resultando em uma menor resistência à tração em comparação com o urdume (Ferdous *et al.,*2014).

3.4. DENSIDADE

A densidade têxtil, definida como o número de fios presentes em uma área específica do tecido (fios por centímetro quadrado), exerce influência sobre a resistência à tração. Contudo, é importante ressaltar que essa relação não é direta ou linear, sendo modulada por outros fatores significativos como a espessura do fio (título), o tipo de fibra utilizada e a própria padronagem do tecido (Ozdemir *et al.,* 2013).

Apesar dessa complexidade, alguns estudos sugerem uma tendência geral: tecidos com maior densidade de fios tendem a apresentar maior resistência. O Gráfico 3 ilustra essa possível correlação na padronagem cetim, onde se observa que a maior densidade média de fios na direção do urdume está associada aos valores mais elevados de resistência à tração nessa mesma direção. Esse comportamento também foi verificado nas estruturas em tela e sarja, conforme apresentado nos Quadros 1 e 2.

Gráfico 3. Análise da resistência à tração: Influência da Densidade – Padronagem Cetim



Essa observação pode ser atribuída ao maior número de fios de urdume que se entrelaçam na estrutura do tecido. Essa maior concentração de fios promove uma estrutura mais compacta e coesa. Essa coesão estrutural aprimorada contribui diretamente para a maior capacidade do tecido de resistir às forças de tração aplicadas na direção do urdume (Nassif e Ali, 2012), pois um maior número de fios trabalhando em conjunto distribui a carga de forma mais eficaz.

3.5. ALONGAMENTO

O alongamento têxtil é a variação no comprimento de um material quando submetido a uma força de estiramento. Durante os testes realizados com o dinamômetro, avalia-se a capacidade do tecido de se alongar sob forças de tração. Os níveis de alongamento variam significativamente entre diferentes tecidos, sendo influenciados pela composição das fibras e pela estrutura da padronagem (Maluf e Kolbe, 2003).

É crucial entender que resistência à tração e alongamento são propriedades distintas e não necessariamente correlacionadas de forma direta (Schmitt Lunkes e Folle, 2021). Um tecido pode ser extremamente resistente à ruptura (alta resistência à tração) mas apresentar pouca capacidade de se estender (baixo alongamento), ou vice-versa, dependendo de suas características intrínsecas.

A Tabela 3 apresenta os valores médios de resistência à tração e alongamento para os tecidos analisados (tela, sarja e cetim), permitindo uma comparação direta dessas propriedades.

Tabela 3. Média da Resistência à tração e Média do alongamento

Tecido	Média da Resistência à Tração – Urdume (kfg)	Média da Resistência à Tração – Trama (kfg)	Alongamento - Urdume (%)	Alongamento - Trama (%)
TELA	47,8	24,07	12,25	16,93
SARJA	160,96	94,82	41,63	22,09
CETIM	125,91	68,837	44,78	28,48

Na Tabela 3, observa-se que os tecidos analisados apresentaram maior resistência à tração quando acompanhados de valores mais altos de alongamento. Conforme Theisen *et al.,*(2024), o aumento no alongamento pode estar relacionado ao maior alongamento da fibra de elastano, especialmente nos tecidos de cetim.

É importante destacar a diferença entre os fios de trama e de urdume. Durante o processo de tecelagem, os fios de urdume são submetidos a maior tensão, o que os torna mais resistentes em comparação aos fios de trama. Além disso, os fios de urdume geralmente apresentam maior torção, o que contribui para sua resistência superior.

Quanto ao alongamento dos tecidos, os resultados indicaram que o cetim se destacou por sua capacidade superior de alongamento em relação às demais padronagens. Esse comportamento pode ser atribuído à crimpagem dos filamentos sintéticos e ao maior número de flutuadores em sua estrutura, proporcionando maior flexibilidade e adaptabilidade. Essas características estão alinhadas com os achados de Hossain et al. [14], que analisaram comportamentos semelhantes.

4. CONCLUSÃO

Este capítulo apresentou uma análise abrangente das propriedades mecânicas de tecidos têxteis, com destaque para a resistência à tração e o alongamento. A influência de fatores estruturais, como tipo de fibra, densidade, gramatura e padronagem, foi explorada com base em testes padronizados segundo as normas da ABNT, proporcionando importantes conclusões sobre o desempenho dos tecidos.

Os resultados obtidos evidenciaram diferenças significativas entre as três padronagens principais investigadas: tela, sarja e cetim. A tela, com sua estrutura simples e baixa densidade de fios, demonstrou menor resistência à tração e alongamento. Por outro lado, a sarja destacou-se pela robustez, devido à sua configuração diagonal e gramatura elevada, que conferem maior resistência às forças aplicadas. O cetim, embora apresente uma estrutura visualmente delicada e suave, revelou um alto potencial de alongamento, atribuído à composição predominante de fios de poliéster e elastano, aliados à alta densidade e à flexibilidade dos flutuadores em sua construção.

Outro aspecto relevante observado foi a influência da direção do esforço aplicado. Em todas as análises realizadas, a resistência à tração mostrou-se superior na direção do urdume, em razão da maior tensão, torção e firmeza dos fios dessa direção durante o processo de tecelagem.

Esses achados reforçam a importância do estudo das propriedades estruturais dos tecidos para o desenvolvimento de materiais otimizados, alinhados às exigências de qualidade e durabilidade da indústria têxtil. Além disso, os dados apresentados servem como base para novas investigações, ampliando o entendimento das relações entre estrutura, composição e desempenho mecânico dos tecidos têxteis.

REFERÊNCIAS

[1] ABNT NBR 10588. Produtos têxteis - Determinação da gramatura. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1988.

[2] ABNT NBR 10591. Produtos têxteis - Determinação da gramatura por unidade de área de tecidos planos e malhas. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1989.

[3] ABNT NBR 13538. Produtos têxteis - Determinação da resistência à tração e alongamento. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1995.

[4] ABNT NBR ISO 13934-2. Têxteis - Propriedades de tração dos tecidos - Parte 2: Método do arrancamento da faixa. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013.

[5] FERDOUS, N.; RAHMAN, M. M.; ISLAM, M. S. A comparative study on tensile strength of different weave structures. International Journal of Scientific Research Engineering & Technology, v. 3, p. 1307-1313, 2014.

[6] FODRA, R. C.; SOUZA, A. M.; JUNGLES, A. E. Contribuição do círculo de controle de qualidade (CCQ) à aprendizagem organizacional: evidências em uma indústria têxtil catarinense. Revista Produção Online, v. 21, n. 1, p. 1-27, 2021. Disponível em: <https://scholar.google.pt/scholar?hl=pt-BR&as_sdt=0%2C5&q=MELLO%2C+Carlos+Henrique+Pereira.+Gest%C3%A3o+da+qualidade&btnG=>. Acesso em: 29 set. 2024.

[7] FUNG, W. Têxteis em transporte. Manual de têxteis técnicos, p. 490-528, 2000.

[8] GABRIJELČIČ, H.; PERNAR, R.; ZUPIN, Ž. The influence of weave and fabric thread density on tensile properties of fabrics. Fibres & Textiles in Eastern Europe, v. 16, n. 2, p. 43-47, 2008.

[9] HOSSAIN, M.; ALIMUZZAMAN, S.; AHMED, D. M. Effect of weave structure on tensile properties of woven fabrics. Journal of Textile Science and Technology, v. 10, n. 5, p. 345-356, 2023.

[10] HOSSAIN, M. M.; ALIMUZZAMAN, S.; AHMED, D. M. Tear and tensile strength of 100% cotton woven fabrics' basic structures: regression modelling. Fibers and Textiles, v. 30, n. 2, p. 14-25, 2023.

[11] JAHAN, I.; RAHMAN, M. M.; ISLAM, T. Effect of fabric structure on the mechanical properties of woven fabrics. Advance Research in Textile Engineering, v. 2, n. 2, p. 1018, 2017.

[12] MALUF, E.; KOLBE, W. Dados técnicos para a indústria têxtil. 2. ed. São Paulo: IPT/ABIT, 2003.

[13] MELLO, C. H. P. Gestão da qualidade. Pearson Educación, 2011.

[14] NASSIF, A.; ALI, G.; HASSAN, M. Effect of weave structure and weft density on the physical and mechanical properties of micro polyester woven fabrics. Life Science Journal, v. 9, n. 3, p. 2–7, 2012.

[15] OZDEMIR, M.; YUKSEK, D.; KAYNAK, H. The impact of thread density and fiber composition on fabric tensile properties. Textile Research Journal, v. 83, n. 12, p. 1234-1246, 2013.

[16] SCHMITT LUNKES, J.; FOLLE, L. F. Análise do conforto termo fisiológico e da resistência à tração em tecido tramado com algodão reciclado e filamentos obtidos da reciclagem de resíduos pós-consumo de garrafas PET. Matéria (Rio J.), v. 26, n. 1, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620210001.1221>. Acesso em: 02 fev. 2024.

[17] SENAI. Tecelagem. Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial. São Paulo: SENAI-SP Editora, 2015.

[18] THEISEN, F. C.; VIEIRA, D.; SILVA, P. Análise de propriedades em tecidos denim. 12° Colóquio de Moda – 9° Edição Internacional III Congresso de Iniciação Científica em Design e Moda, 2016. Disponível em: <https://www.coloquiomoda.com.br/anais/Coloquio%20de%20Moda%20-%202016/COMUNICACAO-ORAL/CO-06-Processos-Produtivos/CO-06-ANALISE-DE-PROPRIEDADES-EM-

TECIDOS-DENIM.pdf>. Acesso em: 19 ago. 2024.

[19] YASHODHAKUMARI, N.; RAVI, V.; KUMAR, R. Correlation between fabric weight and tensile strength based on fiber type and weave pattern. Journal of Textile Research, v. 18, n. 4, p. 231-240, 2018.

Capítulo 9

Análise do desempenho energético de módulo fotovoltaico com inclinação sob condições climáticas em São Luís, Maranhão

Lourival Matos de Sousa Filho
João Gabriel Paiva Sousa
Luiz Otávio Algave Chaves
André Barros de Oliveira
Keyll Carlos Ribeiro Martins
Jean Robert Pereira Rodrigues
Wellinton de Assunção
Fernando Lima de Oliveira

Resumo: Este trabalho apresenta uma análise experimental do desempenho energético de um módulo fotovoltaico sob diferentes ângulos de inclinação, considerando as condições climáticas de São Luís, Maranhão. O objetivo foi determinar a influência da inclinação na temperatura operacional, eficiência energética e potência elétrica gerada. Para isso, foi instalado um sistema fotovoltaico off-grid no campus da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), utilizando um módulo policristalino de 140 W, com sensores de temperatura e sistema de aquisição de dados para monitoramento contínuo das variáveis. Os testes foram realizados com seis ângulos de inclinação (10°, 12°, 14°, 16°, 18° e 20°), representando situações comuns em instalações urbanas. As medições ocorreram diariamente, entre 08h e 17h30min, durante o mês de agosto. Observou-se que a eficiência energética é maior no início do dia, reduzindo-se à medida que a temperatura do módulo aumenta, especialmente próximo ao meio-dia, quando a irradiação solar é máxima. A temperatura média do módulo alcançou cerca de 50 °C no pico solar, enquanto no início e no final do dia manteve-se entre 35 °C e 37 °C. A corrente, a tensão e, consequentemente, a potência elétrica, seguiram a mesma tendência da irradiação solar: aumentaram até o início da tarde e diminuíram posteriormente. Notou-se que maiores inclinações proporcionaram melhores níveis de eficiência energética, indicando que o ajuste adequado da inclinação pode otimizar significativamente a produção de energia. Este trabalho evidencia a importância de considerar a inclinação do módulo como um fator determinante no desempenho de sistemas fotovoltaicos, especialmente em regiões tropicais. Os resultados oferecem subsídios relevantes para o aprimoramento das práticas de instalação e operação de sistemas solares, visando maior eficiência e sustentabilidade na geração de energia.

Palavras-chave: Eficiência energética, Módulo fotovoltaico, Inclinação, clima tropical.

1. INTRODUÇÃO

A eficiência e a confiabilidade dos sistemas fotovoltaicos são questões fundamentais na transição global para fontes de energia sustentáveis. A energia solar tem desempenhado um papel crucial na matriz energética mundial, com países investindo fortemente em infraestrutura e pesquisa para melhorar sua viabilidade econômica e ambiental. Segundo relatórios da Agência Internacional de Energia (IEA), o crescimento da capacidade fotovoltaica tem superado as expectativas, tornando-se uma das principais alternativas para a redução das emissões de carbono e a independência energética de diversas nações. Vários estudos investigam soluções inovadoras para otimizar o desempenho dos painéis solares, mitigar desafios climáticos e ambientais e aumentar sua vida útil. Ahmed et al. (2024), Alomar & Ali (2021), Cabrera-Escobar et al. (2024) e Benhorma et al. (2024), contribuem para um entendimento aprofundado das diversas abordagens para aprimorar a tecnologia fotovoltaica. A energia solar fotovoltaica tornou-se um dos principais pilares da geração de eletricidade renovável, sendo amplamente adotada em países como China, Estados Unidos, Alemanha e Índia, que lideram a capacidade instalada globalmente. Com os avanços tecnológicos e a redução dos custos de produção, painéis solares estão sendo implementados em diversas regiões do mundo, incluindo áreas remotas onde a eletrificação convencional é inviável. No entanto, a eficiência dos módulos fotovoltaicos ainda é impactada por fatores como temperatura, poeira, sujeira e degradação ao longo do tempo. Estudos como os de Ahmed et al. (2024) e Fateh et al. (2018) exploram estratégias inovadoras para lidar com esses desafios, garantindo maior rendimento e durabilidade dos sistemas. Investigações realizadas por Koehl et al. (2008) e Skoplaki & Palyvos (2009) destacam a influência das condições ambientais sobre o desempenho dos módulos solares, enquanto trabalhos como os de Liu et al. (2015) e Nematchoua et al. (2015) analisam a otimização do isolamento térmico em edifícios para maximizar o uso da energia solar. Pesquisas recentes, como as de Şahin & van Sark (2025), integram aprendizado de máquina para prever a eficiência dos painéis em condições reais, proporcionando uma abordagem mais precisa para a gestão da geração fotovoltaica.

A acumulação de poeira e detritos nos painéis solares é um problema crítico, especialmente em regiões áridas e semiáridas. Ahmed et al. (2024) conduziram uma investigação experimental sobre o uso de revestimentos nano estruturados para reduzir a aderência da poeira nos módulos fotovoltaicos. Seus resultados indicam que tais revestimentos podem aumentar significativamente a eficiência da captação de energia, reduzindo a necessidade de manutenção frequente e limpeza dos painéis. Tayel et al. (2022) exploraram a aplicação de revestimentos hidrofóbicos e autolimpantes, evidenciando sua eficácia na manutenção da eficiência dos painéis ao longo do tempo. Haque (2017) analisou os impactos da deposição de neve e poeira sobre os módulos solares, destacando a importância de estratégias combinadas para minimizar a perda de eficiência. Koehl et al. (2008) avaliaram o envelhecimento e a degradação dos módulos em diferentes condições ambientais, demonstrando como a poluição e os agentes atmosféricos influenciam o desempenho dos sistemas fotovoltaicos. Esses estudos reforçam a necessidade de abordagens inovadoras para garantir o funcionamento eficiente dos painéis solares em diversas condições climáticas.

Estudos como os de Alomar & Ali (2021), Pandey et al. (2015) e Joshi et al. (2010) enfatizam a importância da análise exergética para a otimização do desempenho dos sistemas fotovoltaicos. A eficiência exergética leva em consideração as perdas energéticas que ocorrem durante o processo de conversão de energia solar em eletricidade, permitindo o desenvolvimento de soluções mais eficazes para maximizar o

aproveitamento da radiação solar. Trabalhos como os de Kant et al. (2016) e Skoplaki & Palyvos (2009) destacam a relação entre temperatura operacional e eficiência energética, demonstrando a necessidade de estratégias para mitigar perdas térmicas. Şahin & van Sark (2025) exploraram o uso de aprendizado de máquina para prever a exergia e a eficiência dos módulos em diferentes condições climáticas, fornecendo insights valiosos para otimização energética e controle operacional de sistemas fotovoltaicos.

A temperatura é um fator determinante na eficiência dos painéis solares. Quando a temperatura dos módulos aumenta, sua eficiência de conversão diminui. Diversas abordagens para resfriamento dos painéis foram exploradas, incluindo o uso de dissipadores de calor (Arifin et al., 2020), resfriamento evaporativo (Teo et al., 2012) e sistemas de resfriamento à base de fluidos (Nasir & Husaini, 2018). Cabrera-Escobar et al. (2024) utilizaram a análise de elementos finitos para projetar e simular aletas de resfriamento, demonstrando ganhos significativos na eficiência dos painéis. Outros estudos também investigaram estratégias inovadoras para melhorar o gerenciamento térmico dos módulos fotovoltaicos. Bhattarai et al. (2012) validaram modelos de simulação para sistemas fotovoltaicos térmicos de placa e tubo, enquanto Pavlovic et al. (2021) realizaram análises experimentais e numéricas sobre o comportamento térmico de células solares encapsuladas. Dwivedi et al. (2020) revisaram técnicas avançadas de resfriamento, incluindo materiais de mudança de fase e resfriamento por convecção forçada. Imghoure et al. (2021) avaliaram o desempenho de materiais de mudança de fase em regiões de clima quente, sugerindo sua aplicação para estabilização térmica de painéis solares. Esses estudos indicam que a combinação de múltiplas técnicas de resfriamento pode maximizar a eficiência e a durabilidade dos módulos solares em diferentes condições ambientais.

A integração de materiais de mudança de fase (PCMs) na estrutura dos painéis solares tem sido uma estratégia promissora para reduzir a temperatura operacional e aumentar a eficiência energética. Benhorma et al. (2024) forneceram uma revisão abrangente sobre o uso de PCMs baseados em biomassa, destacando sua viabilidade econômica e sustentabilidade ambiental. Além disso, Fateh et al. (2018) investigaram a aplicação de camadas isolantes de PCMs para melhorar a inércia térmica dos módulos fotovoltaicos, enquanto Imghoure et al. (2021) avaliaram o desempenho desses materiais em regiões de clima quente, demonstrando seu impacto positivo na estabilização térmica dos painéis. Pesquisas de Liu et al. (2015) e Nematchoua et al. (2015) exploraram a otimização da espessura e da composição dos PCMs em diferentes orientações de instalação, contribuindo para uma melhor absorção e liberação de calor. Recentemente, Piasecka et al. (2023) realizaram simulações numéricas para prever o comportamento térmico de painéis solares integrados com PCMs, destacando a importância da escolha de materiais com pontos de fusão adequados para maximizar o desempenho energético dos sistemas fotovoltaicos.

A modelagem computacional desempenha um papel essencial na otimização dos sistemas fotovoltaicos. Autores como Piasecka et al. (2023), Pavlovic et al. (2021), Nasir & Husaini (2018) e Pandey et al. (2015) aplicaram ferramentas como Simcenter STAR-CCM+, MATLAB e CFD para simular diferentes cenários e testar a eficiência de materiais e designs inovadores. Bhattarai et al. (2012) validaram modelos matemáticos de sistemas híbridos fotovoltaicos-térmicos, enquanto Skoplaki & Palyvos (2009) realizaram revisões sobre a dependência térmica da eficiência dos módulos solares. Trabalhos como os de Şahin & van Sark (2025) exploraram a integração de aprendizado de máquina para prever a eficiência energética sob condições climáticas variáveis. Tais estudos contribuem para o

desenvolvimento de tecnologias que minimizam perdas energéticas, melhoram a adaptação dos painéis solares a diferentes ambientes e maximizam a produção de eletricidade.

A importância da validação experimental dos modelos teóricos é evidenciada em vários estudos, como os de Haque (2017), que analisou as perdas de energia em sistemas fotovoltaicos sob condições de neve, e Skoplaki & Palyvos (2009), que revisaram a dependência da eficiência dos módulos fotovoltaicos com a temperatura ambiente. Além disso, pesquisas conduzidas por Teo et al. (2012) avaliaram sistemas de resfriamento ativo para mitigar perdas térmicas, enquanto Kant et al. (2016) analisaram numericamente e experimentalmente a resposta térmica dos módulos solares de silício policristalino. Koehl et al. (2008) investigaram a degradação de módulos fotovoltaicos em ambientes internos e externos, fornecendo insights sobre a durabilidade dos materiais fotovoltaicos. Adicionalmente, estudos de Lenz et al. (2017) analisaram a absorção de energia e eficiência de coletores solares de placa plana, corroborando dados para a calibração de modelos de simulação. Esses estudos fornecem dados empíricos essenciais para a calibração e aprimoramento dos modelos teóricos, possibilitando um avanço contínuo na eficiência dos sistemas fotovoltaicos.

A eficiência dos painéis solares é um fator crucial para a expansão da energia solar como fonte primária de eletricidade em escala global. Os avanços apresentados nos trabalhos citados contribuem significativamente para o desenvolvimento de soluções que garantem maior sustentabilidade e viabilidade econômica para a energia fotovoltaica, consolidando seu papel como um dos pilares da transição energética mundial.

2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para determinar a temperatura operacional e eficiência energética do módulo fotovoltaico, foi instalado um sistema experimental fotovoltaico do tipo off-grid nas dependências do Centro de Ciências Tecnológicas (CCT), localizado no campus da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), em São Luís. O aparato experimental utilizado, Figura 1a, é constituído por um módulo fotovoltaico policristalino modelo YL140P-17B da Yingli Solar, com potência nominal de 140 W; um controlador de carga da marca EP Solar, modelo VS4524BN; um inversor de onda senoidal pura Hayonik, com capacidade de 1000 W; uma bateria estacionária Freedom DF1000 com capacidade nominal de 70 Ah; além de um sistema de aquisição e registro de dados Fieldlogger e oito termopares do tipo K, Figura 1b, para monitoramento contínuo das temperaturas ao longo da superfície do módulo FV. Os parâmetros elétricos (tensão e corrente produzidas pelo módulo FV) e térmicos (temperatura operacional dos módulos) foram monitorados e registrados por meio do sistema de aquisição conectado a um computador, responsável pela interface gráfica com o usuário e pelo armazenamento dos dados coletados durante o experimento. Um diagrama esquemático simplificado dos componentes do sistema está apresentado na Figura 2, mostrando as conexões e a disposição dos equipamentos empregados no estudo.

Figura 1 Aparato experimental (a), Disposição dos termopares sobre o módulo FV (b)

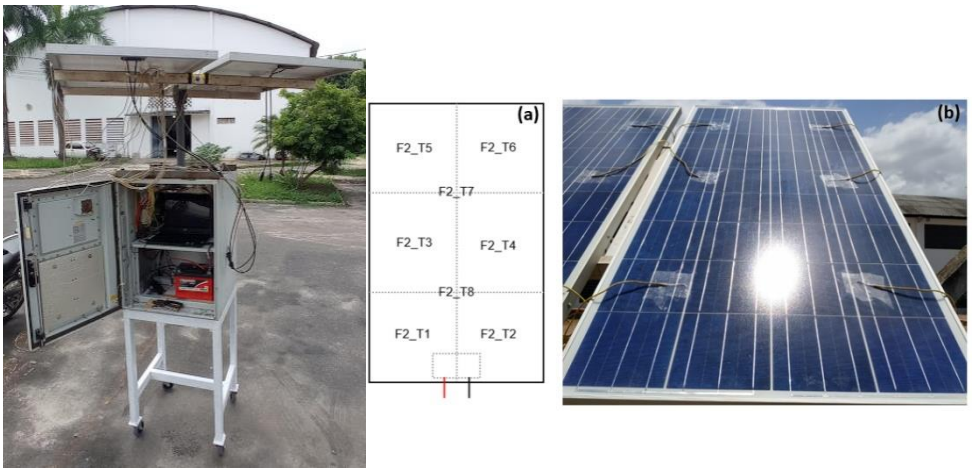
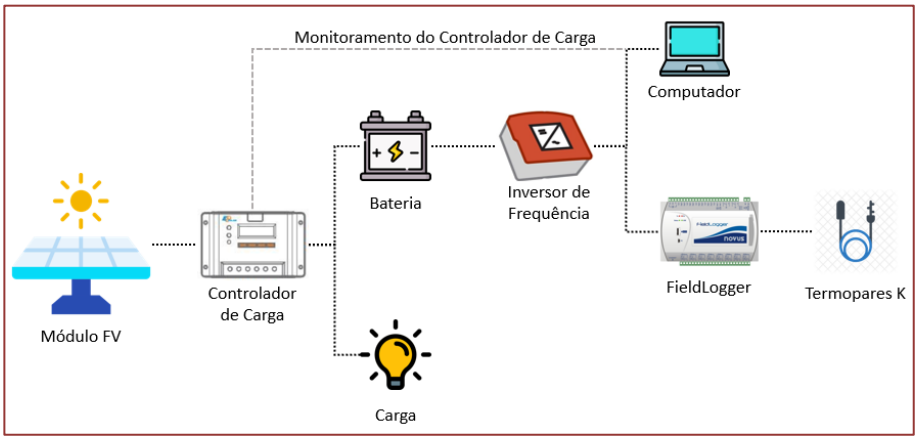


Figura 2 Diagrama dos componentes do sistema



As tabelas 1 e 2 mostram as características elétricas e gerais do painel fotovoltaico, respectivamente.

Tabela 1. Características elétricas do módulo fotovoltaico YL140P-17B

Potência máxima de saída ($P_{máx}$)	**140 W**
Eficiência do módulo (η)	14,0 %
Tensão a máxima potência ($V_{máx}$)	18,01 V
Corrente a máxima potência ($I_{máx}$)	7,77 A
Tensão de circuito aberto (V_{ca})	22,28 V
Corrente de curto-circuito (I_{cc})	8,30 A

Fonte: (Yingli Green Energy, [s.d.])

Tabela 2. Características gerais do módulo fotovoltaico YL140P-17B

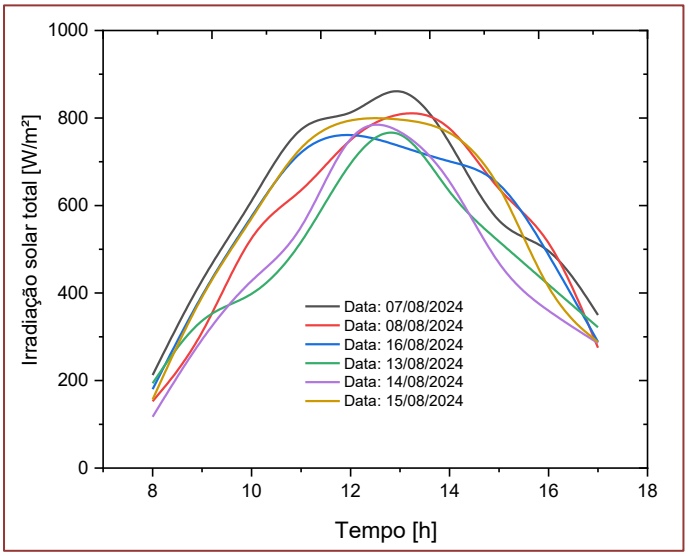
Dimensões do módulo	**1470 mm x 680 mm x 25 mm**
Peso	10,81 kg
Quantidade de células fotovoltaicas	36
Dimensões da célula fotovoltaica	156 mm x 156 mm
Temperatura de operação	-40 a 85°C

Fonte: (Yingli Green Energy, [s.d.])

Os dados utilizados neste estudo podem ser classificados em duas categorias principais: dados obtidos diretamente pelo sistema experimental instalado, como temperatura operacional do módulo fotovoltaico (FV), corrente e tensão geradas; e dados secundários obtidos por meio de bancos de dados institucionais, como o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), o Atlas Global Solar (Global Solar Atlas) e o Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA), os quais fornecem informações sobre irradiância solar, velocidade do vento e temperatura ambiente, dentre outras variáveis meteorológicas disponíveis para consulta online.

Os valores detalhados de irradiância solar horária global (ou total), direta e difusa, Figura 3, foi utilizado o software gratuito RadiaSol2, desenvolvido pelo Laboratório de Energia Solar (LABSOL) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Esta ferramenta é amplamente empregada em pesquisas e dimensionamentos de sistemas solares no território brasileiro, permitindo gerar séries horárias de irradiância solar com base em modelos matemáticos de radiação (Duffie; Beckman; Blair, 2020). O software RadiaSol2 utiliza como entrada (input) séries temporais de radiação solar provenientes do banco de dados SWERA.

Figura 3. Irradiação Solar para vários dias na cidade de São Luís-MA



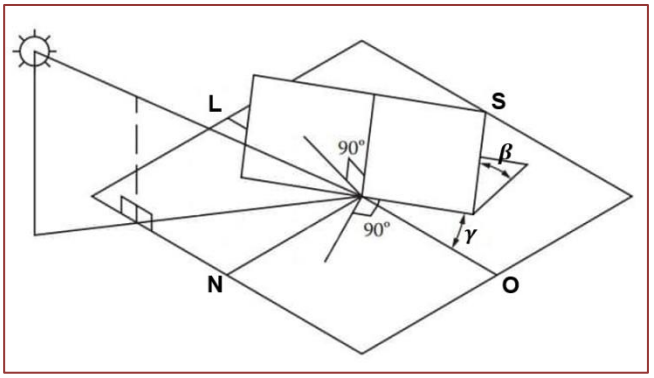
Fonte: Software RadiaSol2

Os parâmetros experimentais do sistema fotovoltaico instalado foram coletados diariamente no intervalo das 08h às 17h30min, no período do mês de agosto na cidade de São Luís/MA que está localizada 2°33'17,3" S, 44°15'57,7" W. As medições de temperatura do módulo fotovoltaico foram realizadas por meio de termopares tipo K, com aquisição automática dos dados em intervalos regulares de cinco minutos, armazenados diretamente na memória interna do sistema Fieldlogger. Por outro lado, os valores de tensão e corrente produzidas pelo módulo foram obtidos utilizando o software de monitoramento EPEVER, sendo registrados continuamente em tempo real por meio de captura das telas do software.

Dado que o posicionamento angular dos módulos fotovoltaicos afeta diretamente a absorção da radiação solar incidente e, consequentemente, a eficiência do sistema, foi realizado um estudo sobre a influência do ângulo de inclinação (β) sobre a energia produzida, bem como sobre a eficiência energética do módulo FV. Durante os testes experimentais, o ângulo azimutal (γ) foi mantido constante em 0°N (face do módulo orientada para o Norte geográfico), garantindo incidência solar direta durante todo o percurso aparente diário do sol do Leste ao Oeste, conforme recomendado na literatura especializada (Duffie; Beckman; Blair, 2020).

Os ângulos de inclinação, β, do módulo fotovoltaico adotados neste trabalho foram 10°, 12°, 14°, 16°,18° e 20°, escolhidos com base em valores típicos de inclinação de telhados residenciais, que representam grande parte das instalações fotovoltaicas urbanas. A Figura 4 apresenta esquematicamente a definição dos ângulos β e γ no contexto da instalação do painel fotovoltaico estudado.

Figura 4. Ângulos de posicionamento do módulo fotovoltaico



Fonte: Adaptado de (Goswami, 2015).

Para a realização dos experimentos, inicialmente era realizada uma limpeza minuciosa do módulo fotovoltaico, garantindo a remoção completa de poeira ou outras partículas depositadas sobre sua superfície, evitando assim possíveis interferências e erros nas medições realizadas. Em seguida, os termopares do tipo K eram fixados sobre o módulo FV, distribuídos ao longo da superfície em espaçamentos regulares e padronizados, permitindo uma medição representativa e uniforme da temperatura operacional em toda a área do painel.

Após a instalação dos sensores, o sistema de aquisição e registro de dados era ligado, iniciando simultaneamente o monitoramento contínuo das temperaturas dos termopares,

bem como a gravação da corrente elétrica e da tensão produzida pelo módulo FV. Cada teste experimental tinha início por volta das 07:00 horas da manhã, período em que a irradiância solar incidente ainda apresentava valores muito baixos, garantindo que a temperatura inicial do módulo fotovoltaico estivesse próxima à temperatura ambiente.

Durante as primeiras duas horas do experimento, os parâmetros temperatura, corrente e tensão eram coletados em intervalos de cinco minutos, permitindo obter uma resolução detalhada das condições iniciais de operação do sistema fotovoltaico. Após esse período inicial, as medições passaram a ser realizadas em intervalos maiores, a cada 30 minutos, prosseguindo dessa forma até aproximadamente as 17:30 horas, momento em que a irradiância solar já apresentava valores reduzidos devido à baixa altura do sol no horizonte, indicando o encerramento da coleta de dados diária.

3. MODELAGEM TERMODINÂMICA

A análise energética empregada neste estudo fundamenta-se na primeira lei da termodinâmica, que aborda quantitativamente os balanços de energia em sistemas termodinâmicos, explicitando o princípio de conservação da energia. Segundo este princípio, em qualquer processo termodinâmico a energia não pode ser criada nem destruída, sendo apenas transformada de uma forma para outra (Çengel; Boles, 2013). Dessa forma, para uma análise energética completa do desempenho de um módulo fotovoltaico, torna-se essencial compreender claramente os fluxos energéticos envolvidos no sistema em estudo.

Figura 5. Balanço energético de um módulo fotovoltaico

Na Figura 5, apresenta-se um esquema ilustrativo padrão do módulo fotovoltaico, indicando claramente os fluxos de energia que entram e saem do sistema. Analisando esse esquema e considerando as hipóteses adotadas na literatura especializada-regime permanente e ausência de troca de calor com o ambiente (as propriedades permanecem constantes ao longo do tempo) obtém-se a equação geral do balanço energético, expressa pela Equação 1 (Duran Sahin; Dincer; Rosen, 2007; Joshi; Dincer; Reddy, 2009; Ogbonnaya; Turan; Abeykoon, 2019; Pandey et al., 2015).

$$\dot{E}_{solar} = \dot{W}_{elétrica} \qquad \text{Equação 1}$$

Assumindo que a irradiância solar incidente sobre a superfície do módulo fotovoltaico é totalmente absorvida pelo sistema, a energia solar disponível para conversão energética pode ser calculada por meio da Equação 2 (Arslan; Aktaş; Can, 2020; Duran Sahin; Dincer; Rosen, 2007; Fudholi et al., 2018; Joshi; Dincer; Reddy, 2009; Ogbonnaya; Turan; Abeykoon, 2019):

$$\dot{E}_{solar} = I_{solar} \times A_m \qquad \text{Equação 2}$$

Onde A_m representa a área útil de absorção do módulo fotovoltaico em m^2, obtida através da multiplicação da área de cada célula fotovoltaica pela quantidade de células do módulo. E I_{solar} consiste nos dados de irradiância solar global no plano horizontal (direta + difusa) em unidades de W/m^2 que, por sua vez, são dados obtidos através do software RadiaSol2.

Na análise energética idealizada do sistema, supondo-se que toda energia absorvida pelo módulo é integralmente convertida em energia elétrica, a potência elétrica produzida pelo módulo fotovoltaico pode ser calculada através da Equação 3 (Arslan; Aktaş; Can, 2020; Joshi; Dincer; Reddy, 2009; Pandey et al., 2015):

$$\dot{W}_{elétrica} = V_{pro} \times I_{pro} \qquad \text{Equação 3}$$

Onde:

V_{pro} – Tensão produzida [V];

I_{pro} – Corrente produzida [A]

De acordo com Çengel e Boles (2013), a eficiência energética é definida como uma medida quantitativa da eficácia de um dispositivo ou sistema na conversão de energia disponível em uma forma útil desejada. Nesse contexto, a eficiência do módulo fotovoltaico pode ser obtida pela relação entre a potência elétrica gerada pelo módulo e a energia solar incidente disponível para conversão (Aberoumand; GhamarI; Shabani, 2018; Arslan; Aktaş; Can, 2020; ChandeR et al., 2015; Joshi; Dincer; Reddy, 2009; Ogbonnaya; Turan; Abeykoon, 2019; Pandey et al., 2015; Rawat, 2017). Matematicamente, a eficiência energética é expressa pela Equação 4:

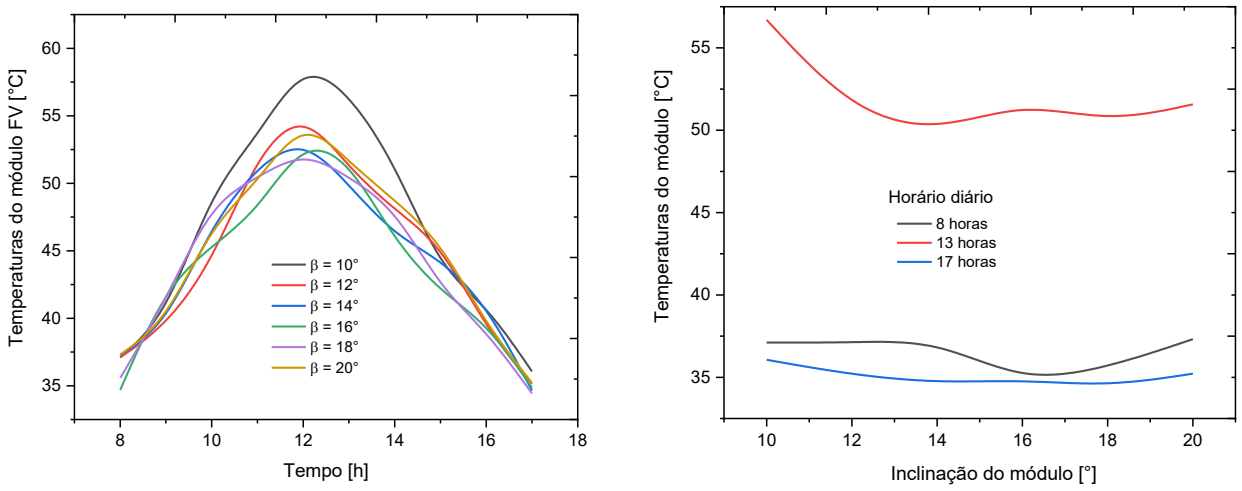
$$\eta = \frac{\dot{W}_{elétrica}}{\dot{E}_{solar}} \qquad \text{Equação 4}$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A energia captada por uma placa solar é máxima quando os raios solares incidem perpendicularmente à superfície da placa. Uma placa posicionada na horizontal dificilmente recebe a radiação solar diretamente perpendicular, exceto em localidades próximas à linha do Equador ao meio-dia em determinadas épocas do ano. Já uma placa inclinada pode ser orientada para maximizar a incidência solar ao longo do ano. Os resultados apresentados mostram que dependendo da inclinação da placa pode-se obter melhoria na eficiência da placa. Vale ressaltar para cada dia do mês, Tabela 3, foi realizado o experimento para uma inclinação especifica, ocasionando algumas divergências nos

dados por causa das condições climáticas que não foram as mesmas para cada dia. Na Figura 6 mostra a influência da inclinação do módulo na temperatura da placa. Três períodos do dia, 08h00, 13h00 e 17h00, foram escolhidos para facilitar a compreensão da influência da inclinação da placa na temperatura do módulo.

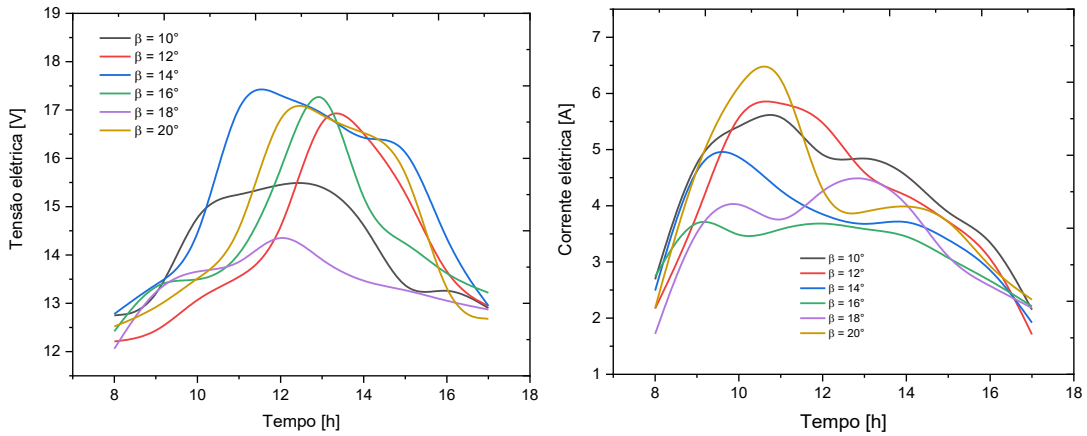
Figura 6 – Influência da inclinação da placa FV na temperatura do módulo



Como já era esperado, no horário de maior irradiação solar, por volta das 13h00, a temperatura do módulo atinge valores elevados, com uma média aproximada de 50 °C. No início do dia, quando os primeiros raios solares começam a incidir sobre a superfície da placa, a temperatura média registrada é de aproximadamente 37 °C. Já ao final da tarde, durante o pôr do sol, observa-se uma redução na temperatura do módulo, estabilizando-se em torno de 35 °C. Esses dados demonstram claramente a correlação entre a intensidade da radiação solar e a elevação da temperatura da placa ao longo do dia.

Na Figura 7, observa-se que tanto a corrente elétrica quanto a tensão elétrica apresentam uma tendência de aumento até aproximadamente às 13h00, momento em que a irradiação solar atinge seu pico. A partir desse horário, com a redução gradual da intensidade da radiação solar incidente sobre a placa fotovoltaica, verifica-se uma diminuição correspondente nesses parâmetros elétricos. Consequentemente, a potência elétrica gerada pelo sistema segue a mesma tendência, aumentando progressivamente até o início da tarde e decrescendo conforme a irradiação diminui no período vespertino.

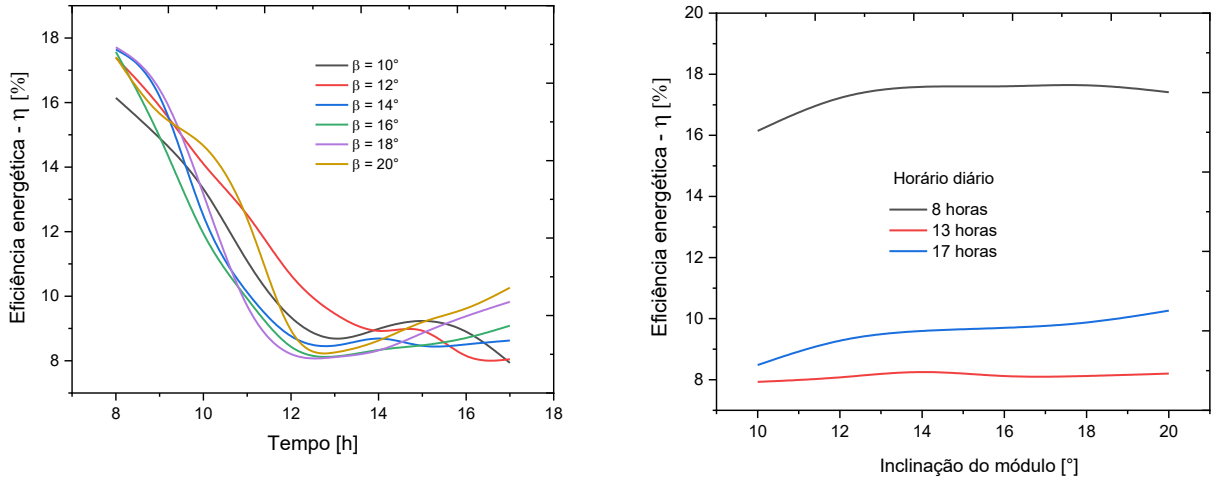
Figura 7 - Influência da inclinação da placa sobre tensão e corrente elétrica



A Figura 8 ilustra o efeito da inclinação da placa sobre a eficiência energética do sistema fotovoltaico. Observa-se que, no início do dia, a eficiência é relativamente elevada, diminuindo gradualmente ao longo das horas. No entanto, ao final do dia, ocorre um pequeno aumento nesse parâmetro. Notavelmente, o valor mínimo de eficiência coincide com o período de máxima irradiação solar, uma vez que, nesse momento, a temperatura do módulo é mais elevada, o que provoca uma redução no desempenho energético devido ao efeito negativo da temperatura sobre a eficiência dos painéis fotovoltaicos.

Verifica-se que, quanto maior a inclinação do módulo, maior tende a ser a eficiência energética. Esse comportamento evidencia a importância do ajuste adequado da inclinação da placa para otimizar a captação de energia solar e minimizar as perdas associadas ao aumento da temperatura.

Figura 8 - Influência da inclinação da placa sobre a eficiência energética



5. CONCLUSÃO

Os resultados apresentados neste estudo evidenciam de forma clara a importância da inclinação da placa fotovoltaica no desempenho energético do sistema. A eficiência máxima da captação solar ocorre quando a radiação incide perpendicularmente à superfície do módulo, o que justifica a necessidade de ajustes angulares conforme as condições geográficas e sazonais. A análise experimental revelou que diferentes inclinações resultam em variações significativas na temperatura, corrente, tensão e, consequentemente, na eficiência energética da placa ao longo do dia.

Verificou-se que a temperatura do módulo aumenta consideravelmente durante o período de maior irradiação solar, especialmente por volta das 13h00, atingindo valores médios de aproximadamente 50 °C. Esse aumento térmico impacta negativamente a eficiência energética do sistema, visto que temperaturas mais elevadas reduzem o desempenho dos módulos fotovoltaicos. Por outro lado, no início e no final do dia, quando as temperaturas são mais amenas, a eficiência é relativamente superior, embora a irradiação seja menor.

Outro aspecto relevante observado foi a relação direta entre a inclinação da placa e a eficiência energética. As inclinações mais acentuadas demonstraram favorecer a elevação da eficiência, especialmente durante os períodos de menor irradiação, ao otimizar o ângulo de incidência dos raios solares. Esse resultado reforça a necessidade de estratégias de posicionamento e instalação que considerem não apenas a latitude da localidade, mas também as variações sazonais e as condições climáticas típicas da região.

Adicionalmente, a análise dos parâmetros elétricos — corrente, tensão e potência — revelou um comportamento coerente com o perfil da irradiação solar ao longo do dia. A potência gerada atingiu seu pico próximo ao meio-dia, seguindo a tendência da corrente e tensão, e declinou progressivamente à medida que a intensidade solar diminuiu. Essa dinâmica reforça a necessidade de incorporar sistemas de monitoramento e controle que ajustem, sempre que possível, a inclinação ou a orientação dos módulos em tempo real, como no caso de sistemas de rastreamento solar.

Em síntese, os achados deste estudo corroboram a relevância de práticas de instalação que privilegiem a inclinação ótima dos painéis fotovoltaicos, visando maximizar a eficiência energética e a durabilidade do sistema. Além disso, destacam-se os desafios impostos pelas variações térmicas e climáticas, que devem ser cuidadosamente considerados no dimensionamento e operação de sistemas fotovoltaicos, sobretudo em regiões com elevada amplitude térmica diária. Esses resultados oferecem subsídios importantes para futuras pesquisas e aplicações práticas voltadas ao aprimoramento da geração de energia solar.

REFERÊNCIA

[1] Ahmed, A., Elsakka, M., Elhenawy, Y., Amer, A., Mansi, A., Bassyouni, M., Gadalla, M., & Refaat, A. (2024). Experimental investigation of a nano coating efficiency for dust mitigation on photovoltaic panels in harsh climatic conditions. Scientific Reports, 14(1), 23013. https://doi.org/10.1038/s41598-024-72772-7

[2] Alomar, O. R., & Ali, O. M. (2021). Energy and exergy analysis of hybrid photovoltaic thermal solar system under climatic condition of North Iraq. Case Studies in Thermal Engineering, 28. https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101429

[3] Alomar, O. R., Ali, O. M., Ali, B. M., Qader, V. S., & Ali, O. M. (2023). Energy, exergy, economical and environmental analysis of photovoltaic solar panel for fixed, single and dual axis tracking systems: An experimental and theoretical study. Case Studies in Thermal Engineering, 51.

https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103635

[4] Arifin, Z., Tjahjana, D. D. D. P., Hadi, S., Rachmanto, R. A., Setyohandoko, G., & Sutanto, B. (2020). Numerical and experimental investigation of air cooling for photovoltaic panels using aluminum heat sinks. International Journal of Photoenergy, 2020. https://doi.org/10.1155/2020/1574274

[5] Axaopoulos, I., Axaopoulos, P., Panayiotou, G., Kalogirou, S., & Gelegenis, J. (2015). Optimal economic thickness of various insulation materials for different orientations of external walls considering the wind characteristics. Energy, 90(Part 1), 939–952. https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.07.125

[6] Basem, A., Mukhtar, A., Elbarbary, Z. M. S., Atamurotov, F., & Benti, N. E. (2024). Experimental study on the various varieties of photovoltaic panels (PVs) cooling systems to increase their electrical efficiency. PLoS ONE, 19(9 Septeber). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0307616

[7] Benhorma, A., Bensenouci, A., Teggar, M., Ismail, K. A. R., Arıcı, M., Mezaache, E., Laouer, A., & Lino, F. A. M. (2024). Prospects and challenges of bio-based phase change materials: An up to date review. In Journal of Energy Storage (Vol. 90). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111713

[8] Bhattarai, S., Oh, J. H., Euh, S. H., Krishna Kafle, G., & Hyun Kim, D. (2012). Simulation and model validation of sheet and tube type photovoltaic thermal solar system and conventional solar collecting system in transient states. Solar Energy Materials and Solar Cells, 103, 184–193. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2012.04.017

[9] Brasil, A. C. P. (2016). DYNAMICAL MODELING AND SIMULATION OF PV-SOLAR PANNELS. In Revista Brasileira de Energia Solar Ano (Vol. 7).

[10] Cabrera-Escobar, R., Vera, D., Cabrera-Escobar, J., Paredes Godoy, M. M., Cajamarca Carrazco, D., Zumba Llango, E. R., & Jurado, F. (2024). Finite Element Analysis Method Design and Simulation of Fins for Cooling a Monocrystalline Photovoltaic Panel. Clean Technologies, 6(2), 767–783. https://doi.org/10.3390/cleantechnol6020039

[11] Calise, F., Figaj, R. D., & Vanoli, L. (2017). Experimental and numerical analyses of a flat plate photovoltaic/thermal solar collector. Energies, 10(4). https://doi.org/10.3390/en10040491

[12] Dwivedi, P., Sudhakar, K., Soni, A., Solomin, E., & Kirpichnikova, I. (2020). Advanced cooling techniques of P.V. modules: A state of art. Case Studies in Thermal Engineering, 21. https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100674

[13] Fateh, A., Borelli, D., Devia, F., & Weinläder, H. (2018). Summer thermal performances of PCM-integrated insulation layers for light-weight building walls: Effect of orientation and melting point temperature. Thermal Science and Engineering Progress, 6, 361–369. https://doi.org/10.1016/j.tsep.2017.12.012

[14] Haque, A. (2017). Energy Loss in Solar Photovoltaic Systems Under Snowy Conditions. Journal of Electrical and Electronic Engineering, 5(6), 209. https://doi.org/10.11648/j.jeee.20170506.11

[15] Ibrahim, O. A. A. M., Kadhim, S. A., & Al-Ghezi, M. K. S. (2023). Photovoltaic panels cooling technologies: Comprehensive review. In Archives of Thermodynamics (Vol. 44, Issue 4, pp. 581–617). Polska Akademia Nauk. https://doi.org/10.24425/ather.2023.149720

[16] Imghoure, O., Belouaggadia, N., Ezzine, M., Lbibb, R., & Younsi, Z. (2021). Performance evaluation of phase change materials for thermal comfort in a hot climate region. Applied Thermal Engineering, 186. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116509

[17] Joshi, A. S., Dincer, I., & Reddy, B. v. (2010). Analysis of energy and exergy efficiencies for hybrid PV/T systems. International Journal of Low-Carbon Technologies, 6(1), 64–69. https://doi.org/10.1093/ijlct/ctq045

[18] Kant, K., Shukla, A., Sharma, A., & Biwole, P. H. (2016). Thermal response of poly-crystalline silicon photovoltaic panels: Numerical simulation and experimental study. Solar Energy, 134, 147–155. https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.05.002

[19] Koehl, M., Heck, M., Philipp, D., Weiss, K.-A., Ferrara, C., & Herrmann, W. (2008). Indoor and outdoor weathering of PV-modules. Reliability of Photovoltaic Cells, Modules, Components, and Systems, 7048, 704806. https://doi.org/10.1117/12.794569

[20] Lenz, A. M., de Souza, S. N. M., Nogueira, C. E. C., Gurgacz, F., Prior, M., & Pazuch, F. A. (2017). Análise da energia absorvida e eficiência de um coletor solar de placa plana. Acta Scientiarum -

Technology, 39(3), 279–284. https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v39i3.29352

[21] Liu, X., Chen, Y., Ge, H., Fazio, P., Chen, G., & Guo, X. (2015). Determination of optimum insulation thickness for building walls with moisture transfer in hot summer and cold winter zone of China. Energy and Buildings, 109, 361–368. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.10.021

[22] Nasir, F. H. M., & Husaini, Y. (2018). MATLAB Simulation of Photovoltaic and Photovoltaic/Thermal Systems Performance. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 341(1). https://doi.org/10.1088/1757-899X/341/1/012019

[23] Nematchoua, M. K., Raminosoa, C. R. R., Mamiharijaona, R., René, T., Orosa, J. A., Elvis, W., & Meukam, P. (2015). Study of the economical and optimum thermal insulation thickness for buildings in a wet and hot tropical climate: Case of Cameroon. In Renewable and Sustainable Energy Reviews (Vol. 50, pp. 1192–1202). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.066

[24] Pandey, A. K., Pant, P. C., Sastry, O. S., Kumar, A., & Tyagi, S. K. (2015). Energy and exergy performance evaluation of a typical solar photovoltaic module. Thermal Science, 19, S625–S636. https://doi.org/10.2298/TSCI130218147P

[25] Pavlovic, A., Fragassa, C., Bertoldi, M., & Mikhnych, V. (2021). Thermal Behavior of Monocrystalline Silicon Solar Cells: A Numerical and Experimental Investigation on the Module Encapsulation Materials. Journal of Applied and Computational Mechanics, 7(3), 1847–1855. https://doi.org/10.22055/jacm.2021.37852.3101

[26] Piasecka, M., Piasecki, A., & Dadas, N. (2023). An Experimental Investigation and Numerical Simulation of Photovoltaic Cells with Enhanced Surfaces Using the Simcenter STAR-CCM+ Software. Energies, 16(24). https://doi.org/10.3390/en16248047

[27] Şahin, G., & van Sark, W. G. J. H. M. (2025). Machine Learning-Based Evaluation of Solar Photovoltaic Panel Exergy and Efficiency Under Real Climate Conditions. Energies, 18(6), 1318. https://doi.org/10.3390/en18061318

[28] Simbaña, I., Quitiaquez, W., Cabezas, P., & Quitiaquez, P. (2024). Comparative study of the efficiency of rectangular and triangular flat plate solar collectors through finite element method. Revista Técnica “Energía,” 20(2), 81–89. https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v20.n2.2024.593

[29] Skoplaki, E., & Palyvos, J. A. (2009). On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. Solar Energy, 83(5), 614–624. https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.10.008

[30] Tayel, S. A., Abu El-Maaty, A. E., Mostafa, E. M., & Elsaadawi, Y. F. (2022). Enhance the performance of photovoltaic solar panels by a self-cleaning and hydrophobic nanocoating. Scientific Reports, 12(1). https://doi.org/10.1038/s41598-022-25667-4

[31] Teo, H. G., Lee, P. S., & Hawlader, M. N. A. (2012). An active cooling system for photovoltaic modules. Applied Energy, 90(1), 309–315. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.01.017

[32] Younsi, Z., & Naji, H. (2020). Numerical simulation and thermal performance of hybrid brick walls embedding a phase change material for passive building applications. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 140(3), 965–978. https://doi.org/10.1007/s10973-019-08950-x

Capítulo 10

Aplicação da Metodologia PBL no ensino de Agricultura de Precisão na Engenharia de Biossistemas

Jamile Raquel Regazzo
Noé Jamba Tito
Cintia Cristina Soares
Thiago Lima da Silva
Murilo Mesquita Baesso

Resumo: Diante dos crescentes desafios enfrentados pela agricultura moderna, como aumento da demanda alimentar, escassez de recursos e impactos ambientais, a Agricultura de Precisão (AP) tem se destacado como solução estratégica para otimizar processos produtivos. Para lidar com essas demandas, torna-se essencial a formação de profissionais capacitados, especialmente em cursos como Engenharia de Biossistemas. Este estudo teve como objetivo avaliar a aplicação da metodologia ativa de Aprendizagem Baseada em Problemas (*Problem-Based Learning* – PBL) na disciplina ZEB1060 – Agricultura de Precisão, com foco no desenvolvimento de competências técnicas e transversais. A pesquisa foi conduzida no âmbito do Programa de Aperfeiçoamento de Ensino (PAE), com 29 alunos organizados em grupos, cada um responsável por solucionar uma situação-problema real relacionada à AP. As atividades incluíram listas de exercícios, jogos interativos e desenvolvimento de relatórios e apresentações técnicas. A avaliação foi realizada por meio de critérios objetivos e análise estatística das notas atribuídas às diversas atividades. Os resultados mostraram alto desempenho médio dos alunos, com maior homogeneidade nos trabalhos escritos do PBL e dispersão nas atividades mais analíticas. Houve correlação entre o desempenho contínuo nas atividades e os resultados finais no PBL, indicando que o engajamento progressivo contribuiu para o sucesso. As discussões revelaram que a metodologia favoreceu a autonomia, o pensamento crítico e a aplicabilidade prática do conhecimento, além de alinhar a formação acadêmica às exigências do mercado de trabalho. Conclui-se que o uso do PBL na disciplina contribuiu significativamente para a aprendizagem significativa e para a formação de profissionais mais preparados para enfrentar problemas reais e complexos no setor agrícola.

Palavras-chave: Aprendizagem Ativa, Ensino Superior, Engenharia de Biossistemas, Problem-Based Learning, Agricultura de Precisão.

1. INTRODUÇÃO

A agricultura contemporânea enfrenta desafios cada vez mais complexos e dinâmicos. Com o aumento contínuo da população mundial, a pressão sobre os sistemas produtivos para fornecer alimentos em quantidade e qualidade suficientes tem se intensificado. Segundo a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO) (FAO, 2020), será necessário aumentar em 70% a produção de alimentos até 2050 para atender à demanda global. Soma-se a isso os efeitos das mudanças climáticas, a degradação dos recursos naturais e a redução de áreas agrícolas disponíveis, o que exige uma transformação nos modos de produção e na qualificação dos profissionais do setor.

Nesse contexto, a Agricultura de Precisão (AP) surge como uma abordagem estratégica e tecnológica que busca otimizar o uso dos recursos disponíveis por meio do monitoramento e da análise de dados, promovendo uma produção mais eficiente, sustentável e rentável. A utilização de sensores, drones, sistemas de georreferenciamento e softwares de análise permite a tomada de decisões baseadas em evidências, reduzindo desperdícios e impactos ambientais. No entanto, para operar tais tecnologias e interpretar dados complexos, é necessário formar profissionais com habilidades técnicas, analíticas e de resolução de problemas.

A formação acadêmica tradicional, centrada na transmissão de conteúdo de forma expositiva, muitas vezes não contempla o desenvolvimento das competências exigidas por esse novo cenário. Nesse sentido, metodologias ativas de aprendizagem, como a Problem-Based Learning (PBL) ou Aprendizagem Baseada em Problemas, têm ganhado destaque na educação superior, especialmente em áreas aplicadas como Engenharia e Ciências Agrárias. Estudos demonstram que o PBL pode favorecer a aprendizagem significativa, o engajamento dos alunos, o desenvolvimento do pensamento crítico e a autonomia na busca por soluções (Borochovicius et al., 2014).

A metodologia PBL parte da apresentação de um problema real e desafiador, que serve como ponto de partida para a construção do conhecimento. Os estudantes são encorajados a investigar, levantar hipóteses, buscar informações, aplicar conceitos e propor soluções de forma colaborativa (Bruno & Carolei, 2018). Ao invés de serem receptores passivos de conteúdo, tornam-se protagonistas de sua própria aprendizagem. Em cursos como Engenharia de Biossistemas, onde os desafios do mundo real exigem respostas criativas e bem fundamentadas, essa abordagem mostra-se especialmente promissora.

Dessa forma, a aplicação do PBL na disciplina de Agricultura de Precisão visa alinhar o ensino universitário às necessidades do setor agrícola e às expectativas do mercado de trabalho, contribuindo para a formação de engenheiros mais preparados para lidar com problemas complexos e interdisciplinares.

O objetivo deste trabalho foi avaliar a aplicação da metodologia PBL na disciplina ZEB1060 – Agricultura de Precisão, do curso de Engenharia de Biossistemas, com foco no desenvolvimento de competências técnicas e transversais dos alunos, como trabalho em equipe, pensamento crítico e aplicação prática do conhecimento. Também se busca analisar a percepção dos estudantes quanto à efetividade da metodologia e à sua contribuição para o processo de aprendizagem.

2. METODOLOGIA

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Aperfeiçoamento de Ensino (PAE), no primeiro semestre de 2024, durante o estágio na disciplina obrigatória ZEB1060 – Agricultura de Precisão. A disciplina, ofertada no décimo semestre do curso, visa apresentar os fundamentos da agricultura de precisão, abordando técnicas de coleta e análise de dados, manejo localizado de insumos e o uso de tecnologias como sensoriamento remoto, sistemas de informação geográfica (GIS) e automação agrícola.

Participaram da disciplina 29 alunos regularmente matriculados. Como parte da proposta pedagógica, foi implementada a metodologia ativa de Aprendizagem Baseada em Problemas (Problem-Based Learning – PBL), com o objetivo de promover o desenvolvimento da autonomia, do raciocínio crítico e da capacidade de resolução de problemas complexos no contexto da agricultura de precisão.

Para isso, os alunos foram organizados em grupos de até cinco integrantes, e cada grupo recebeu uma situação-problema distinta, baseada em desafios reais enfrentados no setor agrícola. Os temas, previamente definidos em conjunto com o docente responsável, abrangeram aspectos técnicos e práticos recorrentes na literatura científica e na atuação profissional, conforme descrito na Tabela 1.

Tabela 1. Temas propostos para PBL

Grupo	Tema da situação-problema
1	Desafio da variação de nutrientes no solo
2	Problema de identificação de pragas específicas
3	Desafio da gestão de resíduos agrícolas
4	Desafio da monitorização de condições climáticas
5	Problema de invasão de espécies nativas
6	Desafio da análise de grandes volumes de dados

A partir da situação-problema atribuída, cada grupo teve como tarefa o desenvolvimento de uma solução fundamentada, utilizando os conhecimentos teóricos e práticos adquiridos durante o curso. O trabalho envolveu a elaboração de um relatório técnico contendo a descrição do problema, os métodos adotados, a análise de dados e a solução proposta, além da apresentação oral da proposta em formato de slides.

Ao longo da disciplina, foram aplicadas outras atividades de apoio ao desenvolvimento das competências necessárias para o PBL: duas listas de exercícios (A1 e A2), um jogo interativo (“game”) e a própria atividade do PBL. Todas essas atividades foram pensadas de forma integrada, visando preparar os alunos para lidar com os desafios propostos, além de consolidar o conteúdo teórico e promover o engajamento com as ferramentas de agricultura de precisão.

A avaliação final dos grupos considerou critérios previamente estabelecidos, incluindo: clareza na definição do problema, coerência metodológica, fundamentação teórica, qualidade da análise dos dados, originalidade, aplicabilidade da solução proposta e qualidade da apresentação. A nota global de cada grupo foi obtida a partir da média ponderada entre o desempenho no relatório técnico e na apresentação oral.

A abordagem metodológica deste estudo é de natureza mista, com ênfase nas análises quantitativas e qualitativas. Os dados quantitativos consistem nas notas atribuídas aos grupos nas diversas atividades (A1, A2, game e PBL), e foram submetidos à análise

estatística descritiva (média, mediana, desvio padrão, valores mínimo e máximo). Também foram elaborados gráficos de boxplot para visualização da dispersão das notas, além de análise de correlação de Pearson entre os desempenhos nas atividades, com o objetivo de identificar possíveis relações entre o engajamento dos alunos nas tarefas ao longo da disciplina e o desempenho final no PBL.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise estatística das notas obtidas nas atividades avaliativas da disciplina ZEB1060 – Agricultura de Precisão revelou dados importantes sobre o desempenho dos estudantes e os impactos da metodologia PBL no processo de ensino-aprendizagem.

Conforme mostrado na Tabela 2, a média geral das notas foi elevada em todas as atividades, com destaque para a A1 ($\bar{x}$ = 9,49) e os trabalhos em grupo na etapa final do PBL (PBL Slides, $\bar{x}$ = 9,12). A atividade com maior dispersão foi a A2 (desvio padrão de 1,82), o que pode ser atribuído à sua abordagem mais exigente em termos de análise e aplicação de conceitos. Já a menor variabilidade ocorreu na PBL Escrita, com desvio padrão de 0,38 e coeficiente de variação de apenas 7%, indicando homogeneidade no desempenho dos grupos nesta etapa.

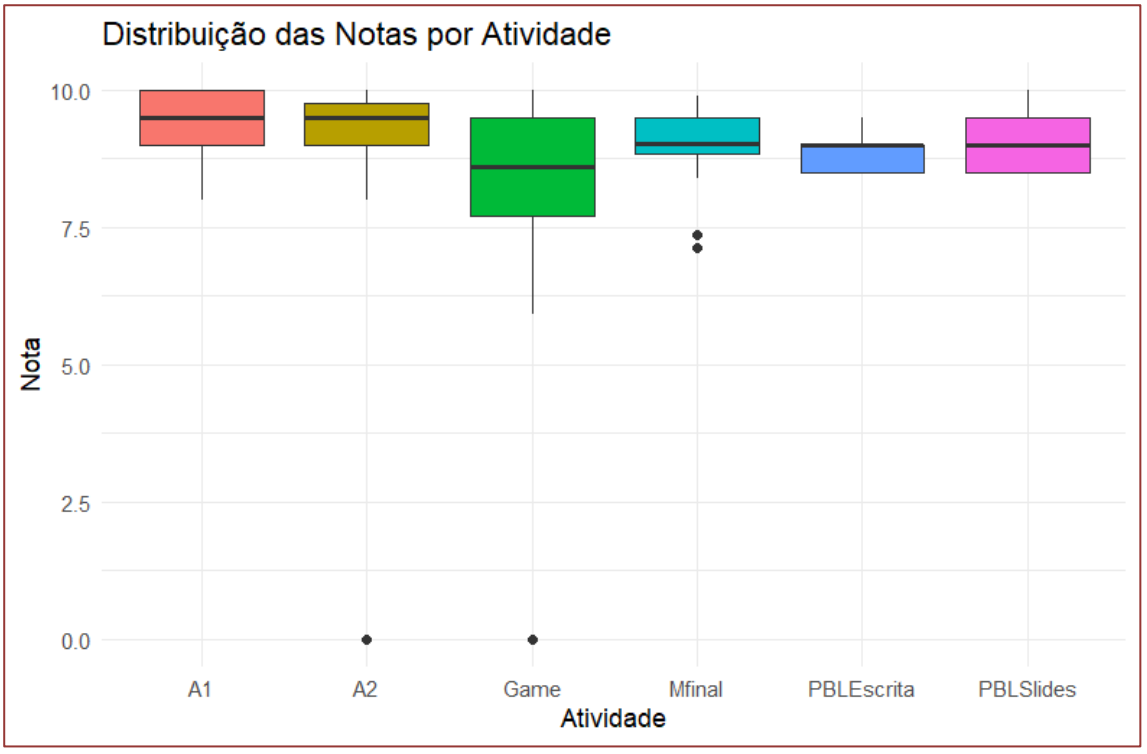
Tabela 2. Estatística descritiva das notas

Atividade	Média	Desvio Padrão	Moda	Mediana	Mín.	Máx.	Coef. Variação
A1	9.491	0.588	9.50	9.550	8.00	10.0	0.109
A2	9.095	1.818	9.50	9.430	0.00	10.0	0.338
Game	8.376	1.976	8.60	8.680	0.00	10.0	0.367
PBL Escrita	8.914	0.380	9.00	8.900	8.50	9.5	0.070
PBL Slides	9.121	0.592	9.00	9.100	8.50	10.0	0.110
Média Final	8.999	0.632	9.02	9.076	7.12	9.9	0.117

Esse resultado está alinhado com estudos que apontam que a aprendizagem baseada em problemas tende a reduzir discrepâncias de desempenho entre os alunos, ao estimular o trabalho colaborativo e a aprendizagem entre pares (De Oliveira Bastos & Vargas, 2022). O fato de todos os grupos terem recebido desafios práticos e multidisciplinares, com apoio contínuo do docente e da monitora do PAE, pode ter contribuído para essa estabilidade nas notas. Além disso, segundo Borochovicius e Tortella (2014), o PBL favorece a motivação dos estudantes, já que os coloca em situação de protagonismo no processo de construção do conhecimento.

A Figura 1, com os boxplots das notas, reforça essa percepção ao mostrar que as atividades do PBL apresentaram menor amplitude entre os valores, quando comparadas a A2 e ao Game. Isso pode indicar que os alunos se sentiram mais preparados ou mais confortáveis ao aplicar os conteúdos em contextos práticos e reais, do que ao responder individualmente listas de exercícios ou jogos avaliativos.

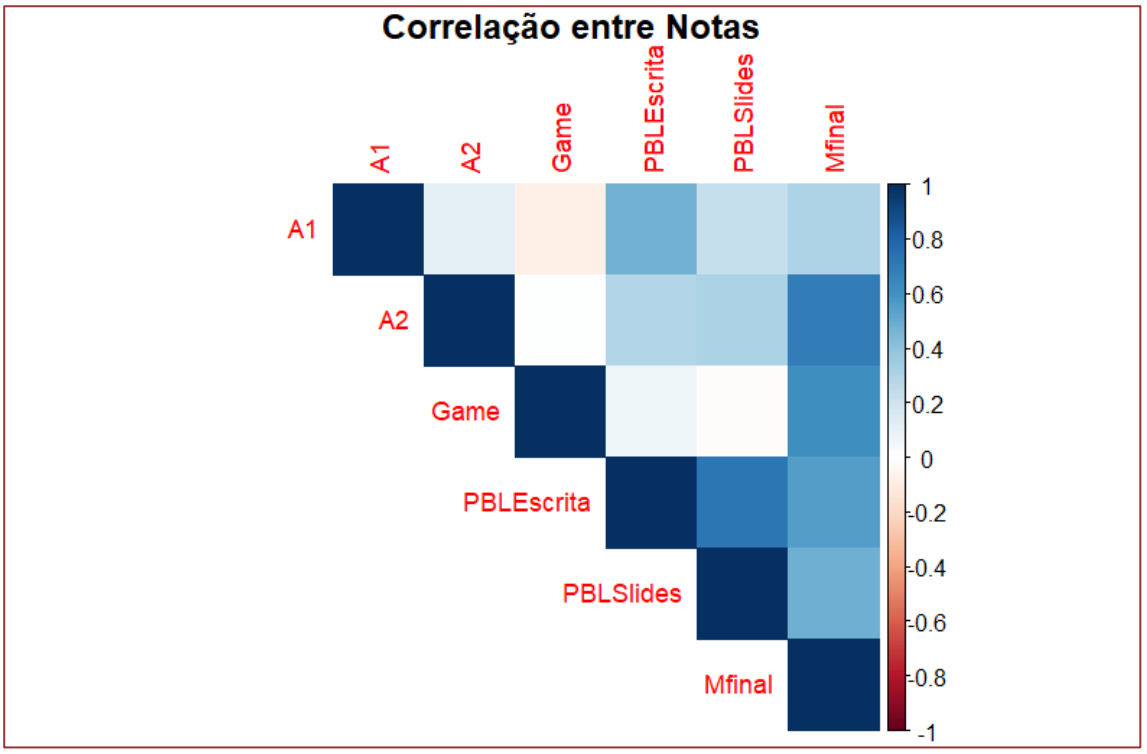
Figura 1. Boxplot das notas por atividade



Os dados da Figura 2, com os coeficientes de correlação de Pearson, fornecem uma visão mais aprofundada sobre as relações entre as atividades. Observa-se uma correlação forte entre A2 e a média final (r = 0,694), sugerindo que o domínio conceitual adquirido ao longo da disciplina influenciou diretamente no desempenho geral. De forma semelhante, o Game apresentou correlação de r = 0,618 com a média final, o que reforça o papel positivo de atividades lúdicas e interativas no aprendizado — algo já destacado em pesquisas sobre gamificação no ensino (Andryê et al., 2020).

A metodologia PBL, por sua vez, apresentou correlações significativas com a média final, especialmente na versão escrita (r = 0,556). Isso evidencia que a produção do relatório técnico foi uma etapa relevante para consolidar o conhecimento dos alunos, exigindo que aplicassem conceitos de forma estruturada e fundamentada. Além disso, a forte correlação entre PBL Escrita e PBL Slides (r = 0,723) indica que os grupos que realizaram um bom trabalho técnico também se destacaram na apresentação, sugerindo coerência entre o conhecimento adquirido e sua comunicação.

Figura 2. Correlação de Pearson para as notas



Estudos de Nuernberg et al.,(2024) demonstrara que o uso do PBL em cursos de Engenharia contribui não apenas para o desenvolvimento cognitivo, mas também para o aprimoramento de habilidades socioemocionais, como comunicação, liderança e trabalho em equipe — competências que são pouco exploradas em modelos tradicionais de ensino, mas essenciais na atuação profissional contemporânea.

É importante destacar que a correlação entre A1 e as demais atividades foi relativamente baixa ($r < 0,5$), indicando que o desempenho inicial não foi um bom preditor do desempenho final. Isso pode reforçar a hipótese de que os alunos evoluíram ao longo do semestre, beneficiando-se do caráter cíclico e integrador da disciplina. Como destaca Calafatti (2016), o PBL é mais eficaz quando associado a um processo contínuo de feedback e avaliação, permitindo que os estudantes reavaliem suas práticas e conhecimentos constantemente.

Dessa forma, os dados sugerem que a combinação de avaliações tradicionais com metodologias ativas — especialmente o PBL — foi eficiente para o desenvolvimento de competências técnicas e transversais. O bom desempenho dos alunos nas atividades finais, aliado às correlações encontradas, indica que a abordagem favoreceu não apenas a assimilação do conteúdo, mas também o desenvolvimento de habilidades aplicadas, em consonância com os objetivos da disciplina.

4. CONCLUSÃO

A aplicação da metodologia Problem-Based Learning (PBL) na disciplina de Agricultura de Precisão demonstrou-se eficaz tanto para o fortalecimento do desempenho acadêmico quanto para o desenvolvimento de competências profissionais entre os alunos do curso

de Engenharia de Biossistemas. A proposta permitiu que os estudantes se engajassem na resolução de problemas autênticos, integrando conteúdos teóricos a práticas contextualizadas e relevantes para o setor agrícola.

A análise dos dados indicou que as atividades do PBL estiveram fortemente associadas ao bom desempenho final dos alunos, além de apresentarem maior homogeneidade nas avaliações, o que reforça a ideia de que a aprendizagem colaborativa pode contribuir para reduzir desigualdades de aproveitamento. A clareza dos critérios avaliativos, a elaboração de soluções aplicáveis e a exposição oral das propostas foram elementos-chave para consolidar a aprendizagem e promover o protagonismo estudantil.

Do ponto de vista prático, os resultados sugerem que metodologias como o PBL têm alto potencial de preparar os futuros engenheiros para lidar com problemas reais, tomar decisões com base em dados e trabalhar de forma integrada em equipes multidisciplinares — competências cada vez mais valorizadas no mercado de trabalho. Diante disso, recomenda-se a ampliação do uso de metodologias ativas em disciplinas técnicas, sobretudo aquelas com forte interface com as demandas do setor produtivo.

REFERÊNCIAS

[1] Andryê, C., Madeira, G., & Serrano, P. H. (2020). Games e Gamificação na Educação: Alternativas para Aumentar o Sucesso das Soluções. In *Revista* (Vol. 33).

[2] Borochovicius, E., Cristina, J., & Tortella, B. (2014). *Aprendizagem Baseada em Problemas: um método de ensino-aprendizagem e suas práticas educativas*.

[3] Bruno, G. da S., & Carolei, P. (2018). Contribuições do Design para o Ensino de Ciências por Investigação. *Revista Brasileira de Pesquisa Em Educação Em Ciências*, 851–878. https://doi.org/10.28976/1984-2686rbpec2018183851

[4] Calafatti, B. D. R. (2016). *O MÉTODO DE ENSINO PROJECT BASED LEARNING E SUAS APLICAÇÕES NO CURSO DE ENGENHARIA BIOQUÍMICA DA ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA*.

[5] De Oliveira Bastos, R., & Vargas, A. B. (2022). CONTRIBUIÇÕES DA APRENDIZAGEM BASEADA EM PROJETOS-PBL-NOS CURSOS DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CONTRIBUTIONS OF PROJECT-BASED LEARNING (PBL) IN UNDERGRADUATE ENGINEERING COURSES. In *Saberes Interdisciplinares, n* (Vol. 28).

[6] FAO. (2020). *The future of food and agriculture: alternative pathways to 2050. Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome*.

[7] Nuernberg, K., Vidotto, S., & Alegre, P. (2024). *ESTRATÉGIA DE ENSINO E APRENDIZAGEM ATIVA: Transformando o ensino de Engenharia por meio do desenvolvimento de experimentos para um Laboratório Virtual*.

Autores

AUTORES

ALINE MARA OLIVEIRA (ORGANIZADORA)

Possui graduação em Engenharia de Controle e Automação pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (2012). Pós Graduada em Gestão de Projetos (FGV 2014-5015). Ministrou aulas no Centro Universitário do Planalto de Araxá(2015-2016) e no CEFET-MG nos cursos de graduação e técnicos. Tem experiência na área de Automação Industrial, Engenharia Elétrica, atuando principalmente nos seguintes temas: redes industriais, proteção de sistemas elétricos, IEC-61850, automação, instrumentação, sistemas de controle, equacionamento de controladores, sistemas multivariáveis e teoria de controle. Trabalhou na indústria no setor de projetos industrias no período de 2007 a 2015. Mestre pela Universidade Federal de Uberlândia. (2017-2019). Atualmente doutoranda no curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia.(2019-2023)

OSVALDO SENA GUIMARÃES (ORGANIZADOR)

Graduação em Engenharia Civil pela Escola de Engenharia Kennedy (1983), Ênfase em Engenharia de Transportes EEK (1983), Análise De Sistemas - UFMG(1985), Especialização em Gestão de Projetos de Engenharia IEC/PUC (2012), Mestrado em Estratégia FEAD (2005). Professor do curso de Engenharia Civil da Universidade do Estado de Minas Gerais (2015-2017 Divinópolis). Professor na Faculdade Senac Minas. Atua na área de ensino superior desde 1988 como Professor, Coordenador de Curso, Coordenador de Extensão, Coordenador de Iniciação Científica e de Pré-incubadora de base Tecnológica. Atua na área de Engenharia, Computação e Projetos desde 1984.

ALESSANDRA BRANDANI BIGGI

Graduação na área de Engenharia Têxtil pela Universidade Estadual de Maringá (UEM) (2006). Possui Especialização na área de Docência no Ensino Superior pelo Centro Universitário de Maringá (CESUMAR) (2010). Possui mestrado em Engenharia Química pela Universidade Estadual de Maringá (2013). Possui Doutorado em Engenharia Têxtil pela Universidade do Minho. É Professora Adjunta Tide na Universidade Estadual de Maringá (UEM) no curso de Engenharia Têxtil.

ANDRÉ BARROS DE OLIVEIRA

Mestrando em Engenharia Mecânica

ANDRÉA FRANCISCA FERNANDES BARBOSA

Possui graduação em Química (Bacharelado) pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2001) e em Química (Licenciatura) pela mesma instituição (2005). Concluiu o Mestrado em Química pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte em 2004 e o Doutorado em Química pela mesma universidade em 2008.Tem experiência na área de Química, com ênfase em processos de extração de amostras, cromatografia gasosa, inibidores de corrosão, caracterização de complexos, processos oxidativos avançados e desenvolvimento de materiais adsorventes. Atuou como professora da Universidade Federal do Maranhão (UFMA) e, atualmente, é professora adjunta da Universidade Federal do Semiárido (UFERSA).

ANTONIO ROBSON GURGEL

Professor do curso de engenharia de petróleo da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, lotado no Centro de Engenharias (2011). Possui graduação em engenharia química pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2006), mestrado (2009) e doutorado (2015) pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo também pela mesma instituição. Concluiu especialização em engenharia de segurança do Trabalho (2010). Tem experiência na área de engenharia de petróleo, com ênfase em engenharia de reservatórios, atuando, principalmente, nos seguintes temas: simulação numérica de reservatórios, modelagem matemática, injeção de vapor, injeção de polímeros e injeção de CO2 associados aos métodos EOR (Enhanced Oil Recovery) de recuperação melhorada de petróleo.

AUTORES

BRUNO NONEMACHER

Mestre em Tecnologia e Engenharia de Materiais, Engenheiro Mecânico e Técnico em Mecânica pelo Instituto Federal do Rio Grande do Sul (IFRS). Atuou como Técnico de Laboratório na área de Mecânica no IFRS entre 2014 e 2024. É especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho (FSG), Engenharia e Gerenciamento de Manutenção (Dom Alberto) e Educação Profissional e Tecnológica (Unibf). Com interesse na docência, lecionou cursos de formação inicial e continuada na área metalmecânica pelo SENAI-RS, onde atuou até maio de 2024. Atualmente, é Professor do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico no IFRS.

FERNANDO LIMA DE OLIVEIRA

Doutor em Engenharia Mecânica

JAMILE RAQUEL REGAZZO

Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo – USP, Piracicaba - SP, Brasil

JARDEL DANTAS DA CUNHA

Possui graduação em Engenharia de Materiais (2004), mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais (2008) e doutorado em Ciências e Engenharia do Petróleo (2014), todos pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Tem experiência nas áreas de corrosão e monitoramento, com atuação em projetos em parceria com a Petrobras e a Transpetro entre 2004 e 2010. Atualmente, é membro do Comitê Gestor do PRH/ANP 55.1, conselheiro da Câmara Especializada em Engenharia Química e Segurança do Trabalho do Conselho Regional de Engenharia e Agronomia do RN (CREA-RN) e diretor de Marketing do CREA-RN. Desenvolve pesquisas com foco em corrosão, com ênfase na aplicação de inibidores de origem vegetal provenientes do semiárido, além de atuar em estratégias de economia circular, incluindo o tratamento e reuso de resíduos e efluentes, e o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis aplicadas ao setor industrial.

JEAN ROBERT PEREIRA RODRIGUES

Doutor em Engenharia Mecânica

JOÃO GABRIEL PAIVA SOUSA

Graduando em Engenharia Mecânica

JULIANO CANTARELLI TONIOLO

Juliano Cantarelli Toniolo é engenheiro de materiais com doutorado pela UFRGS, professor e ex-diretor do IFRS – Campus Caxias do Sul. Tem experiência em pesquisa, gestão acadêmica e inovação, com destaque para o desenvolvimento de uma cadeira de rodas com materiais avançados e atuação como engenheiro de produto na Marcopolo. Possui forte perfil técnico e liderança.

KEILA REGINA SANTANA

Possui graduação em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de Campina Grande (2007). Concluiu o Mestrado do Programa de pós- graduação em ciência e engenharia de Petróleo da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2009) e o doutorado pelo programa de pós graduação em Química pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2014), . E atualmente é professora professora do curso Engenharia de Petróleo da Universidade Federal Rural do Semi-árido, campus Mossoró, atuando principalmente nos seguintes temas: fluidos de perfuração, completação e estimulação, polímeros aplicados a industria do petróleo e engenharia de reservatórios, com ênfase na recuperação avançada de petróleo.

AUTORES

KEYLL CARLOS RIBEIRO MARTINS

Doutor em Engenharia Mecânica

LISIANE TREVISAN

Graduada em Engenharia Metalúrgica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Mestrado e Doutorado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M) da UFRGS, com foco na análise e aprimoramento de processos metalúrgicos e na aplicação de conceitos de metrologia em processo de fabricação. Docente do Instituto Federal do Rio Grande do Sul – Campus Farroupilha.

LOURIVAL MATOS DE SOUSA FILHO

Doutor em Engenharia Mecânica

LUIZ OTÁVIO ALGAVE CHAVES

Mestrando em Engenharia Mecânica

ROBERTA ARAÚJO DE JESUS

Possui pós-graduação em Gestão de Logística e Engenharia de Produção pela Faculdade Estratego (ESTRATEGO - 2021), licenciatura em Matemática pela Universidade Federal de Goiás (UFG - 2015), pós-graduação em Gestão Empresarial pelo Centro de Ensino Superior de Catalão (CESUC - 2008) e bacharelado em Administração de Empresas pelas Faculdades Integradas do Planalto Central (FIPLAC - 2005). Experiências nas áreas administrativas, comerciais, agrícolas, construção civil, gestão educacional, docência, bancária, entre outras; atuando como docente efetiva da Universidade Estadual de Goiás (UEG) no curso de Administração, na unidade de Caldas Novas - GO.

THIAGO TICIANO AIRES DE ARAÚJO

Possui graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte(2006). Tem experiência na área de Engenharia Mecânica.

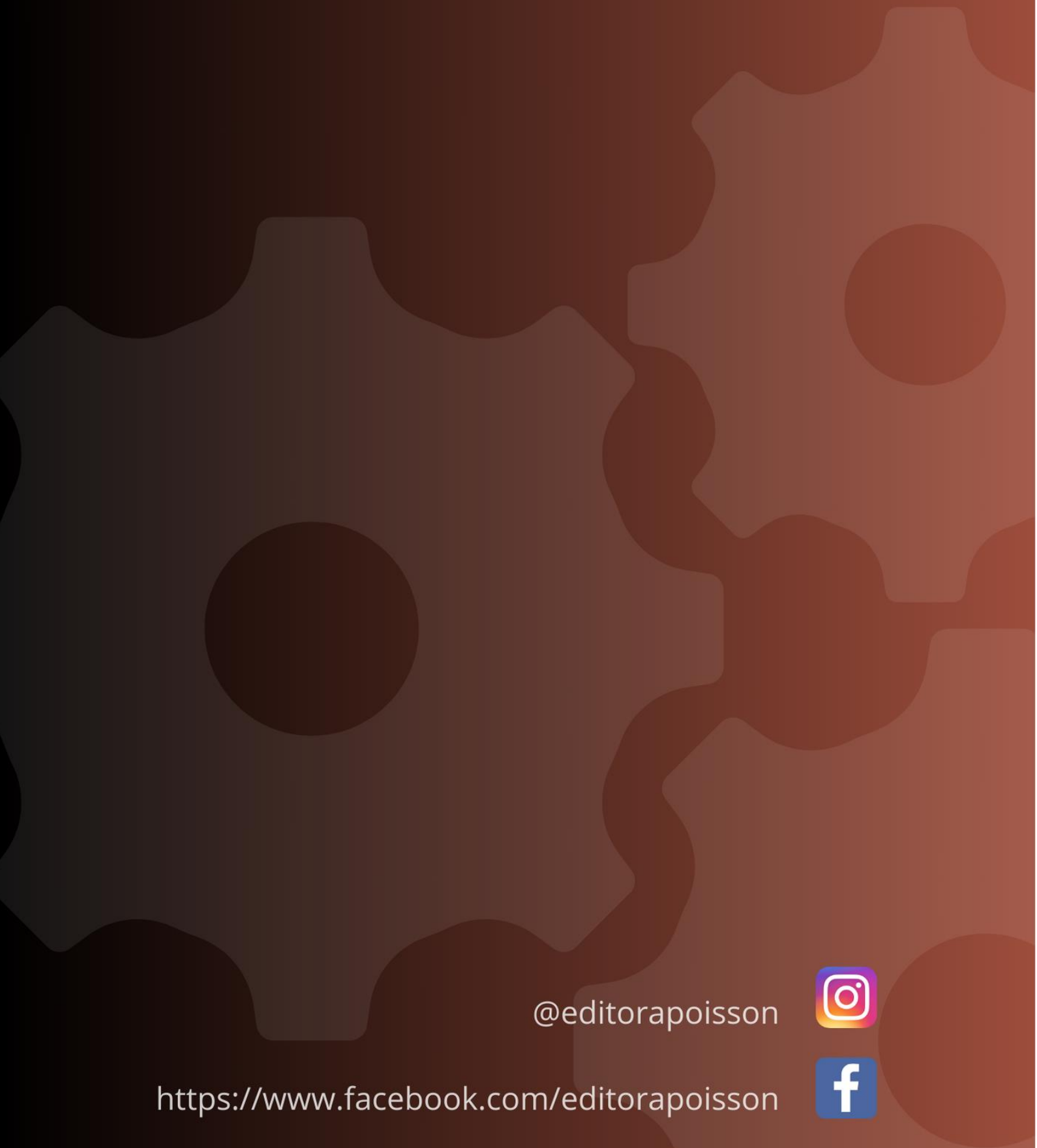
VÍTOR GARBO BERGAMIN

Vítor Garbo Bergamin é formado em Engenharia Mecânica pelo Instituto Federal do Rio Grande do Sul, campus Farroupilha. Possui publicação na Revista Brasileira de Ensino de Física, volume 41, do ano de 2019, com o trabalho: Comparação entre simulação e sistema real de vibração com dois graus de liberdade, onde comparou uma simulação com os dados reais adquiridos e ajustados por meio de transformada rápida de Fourier.

WELLINTON DE ASSUNÇÃO

Doutor em Engenharia Mecânica

www.poisson.com.br
contato@poisson.com.br



@editorapoisson

https://www.facebook.com/editorapoisson